Environnement Canada
Service de la protection de l'environnement

Environment Canada
Environmental Protection Service

Étude théorique, mise au point et essais d'un déflecteur à glaces pour la récupération d'hydrocarbures dans les cours d'eau

Canada

Développement technologique
Rapport SPE 4-EC-79-2F

Direction générale du contrôle des incidences environnementales
Octobre 1982

LES RAPPORTS DU SERVICE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Les rapports sur le développement des techniques décrivent l'équipement technique, les méthodes ainsi que les résultats des études de laboratoire, des usines pilotes et des travaux de démonstration ou d'évaluation du matériel. Ils constituent la source principale d'information sur la recherche et les travaux de démonstration du Service de la protection de l'environnement.

Le Service publie nombre d'autres rapports dans les collections suivantes : Règlements, codes et méthodes d'analyse, Politique et planification, Analyse économique et technique, Développement des techniques, Surveillance, Exposés et mémoires soumis à des enquêtes publiques, Evaluation des incidences sur l'environnement et Guides de formation.

Pour tout renseignement, prière de s'adresser au Service de la protection de l'environnement, Ministère de l'Environnement, Hull (Québec), Canada, K1A 1C8.

ENVIRONMENTAL PROTECTION SERVICE REPORT SERIES

Technology Development Reports describe technical apparatus and procedures, and results of laboratory, pilot plant, demonstration or equipment evaluation studies. They provide a central source of information on the development and demonstration activities of the Environmental Protection Service.

Other categories in the EPS series include such groups as Regulations, Codes and Protocols; Policy and Planning; Economic and Technical Review; Surveillance; Briefs and Submissions to Public Inquiries; and Environmental Impact and Assessment.

Inquiries pertaining to Environmental Protection Service Reports should be directed to the Environmental Protection Service, Department of the Environment, Hull, Quebec, Canada, K1A 1C8.

Étude théorique, mise au point et essais d'un déflecteur à glaces pour la récupération d'hydrocarbures dans les cours d'eau

par

Gee Tsang
Division de la recherche hydraulique
Institut national de recherche sur les eaux
Centre canadien des eaux intérieures
Burlington, Ontario

et

N. Vanderkooy
Direction des interventions d'urgence
Région de l'Ontario
Service de la protection de l'environnement

SPE 4-EC-79-2F
Octobre 1982

Publication distribuée
par le Service de la protection de l'environnement
d'Environnement Canada
Ottawa
K1A 1C8

Édition française de
Theory, Development and Testing of an Ice-Oil Boom
préparée par le Module d'édition française
d'Environnement Canada

Numéro de catalogue: EN 46-4/79-2F
ISBN: 0-662-91826-6

©
Ministre des Approvisionnements et Services
1984

AVIS

Le présent rapport a été revu par la Direction des interventions d'urgence du Service de la protection de l'environnement qui en a approuvé la publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement que le contenu du rapport reflète les opinions et les politiques du Service. La mention de marques de commerce et de produits commerciaux ne constitue pas une approbation de leur emploi.

REMERCIEMENTS

Notre travail n'aurait pu être mené à bien sans la collaboration et l'appui de nombreuses personnes et organisations. Nous tenons spécialement à exprimer notre gratitude aux personnes suivantes et aux organisations auxquelles elles appartiennent: M. R. Carson, Division de la recherche en hydraulique, Institut national de recherche sur les eaux, CCEI, responsable de la conception du prototype, qui nous a aidés lors des essais en laboratoire; le commodore C. Corbett, USCG, qui s'est chargé du financement et de la gestion du contrat de construction du prototype; J. Bennett, de la Garde côtière canadienne, qui a dirigé les essais sur le terrain; le capitaine C. Beckett, de la Garde côtière canadienne, qui a collaboré à l'organisation des essais sur le terrain et MM. T.M. Dick et Y.L. Lau, de la Division de la recherche en hydraulique, Institut national de recherche sur les eaux, CCEI, qui ont révisé le présent rapport et contribué à la gestion du projet.

RÉSUMÉ

Ce rapport traite de la mise au point d'un déflecteur destiné à récupérer des hydrocarbures déversés dans un cours d'eau qui charrie des plaques de glace. Ce déflecteur fonctionne à la manière d'un gouvernail. Il est constitué d'éléments dans lesquels des ouvertures ont été pratiquées pour laisser passer l'eau et les hydrocarbures. Chaque élément est muni d'un safran orientable. Après s'être engouffrés par les ouvertures, l'eau et les hydrocarbures se heurtent contre les safrans et sont ainsi déviés vers le rivage d'où il est plus facile de récupérer les hydrocarbures.

Une analyse théorique approfondie a permis d'établir des relations entre l'angle des safrans par rapport à l'estacade et celui du déflecteur par rapport au courant, entre la taille des plaques de glace déviées et l'orientation du déflecteur, et finalement entre la force de traînée et l'angle des safrans. L'analyse a permis de déterminer divers paramètres et d'en étudier les effets sur l'efficacité du déflecteur.

Les résultats de l'étude théorique ayant démontré qu'un tel déflecteur était réalisable et qu'il devrait être efficace, des essais préliminaires en laboratoire furent effectués à l'aide d'un modèle réduit. Ces expériences confirmèrent que ce genre de déflecteur devrait fonctionner dans une rivière charriant des glaces. Un prototype fut donc construit et fut mis à l'essai dans la rivière Detroit. Les expériences sur le terrain n'ont fait que confirmer les déductions tirées des études théoriques.

Des expériences ultérieures viseront à déterminer certains paramètres de conception. Un deuxième prototype sera mis à l'essai dans le but de parfaire la technique de mise en place du déflecteur et d'améliorer le taux de récupération des hydrocarbures.

ABSTRACT

This paper reports the development of a novel boom for use when oil is spilled on flowing water infested with ice floes. The boom utilizes the ruddering principle and consists of a perforated boom body and a number of fins behind the boom. The angle between the fins and the boom is adjustable. The impinging of the current on the fins brings the boom into the flow and the boom makes an angle with the current. While the surface current and the oil slick are able to pass through the perforating holes in the boom to the ice-free area behind the boom, the ice floes are barred from entering the area and are guided to one side. After flowing through the perforated holes, the surface current is further deflected by the fins towards the shore, carrying with it the oil slick to the slow shore region for easy recovery.

Detailed theoretical analysis is made relating the angle between the fins and the boom to the angle between the boom and the current; relating the size of the ice floe that a boom can deflect to the corresponding yielding angle of the boom and relating the force on the boom to the angle between the fins and the boom. Different parameters are identified and their effects on the performance of the boom are thoroughly studied. Based on the theoretical investigations, one now can design a boom for practical use.

Preliminary laboratory experiments were performed on a model boom. The laboratory testing confirmed the feasibility of the ice-oil boom.

A prototype boom was constructed and field tested in the Detroit River. The field experiment confirmed theoretical predictions and showed that the newly developed boom can perform its duties as expected.

Further laboratory experiments are being planned for obtaining some design coefficients. A second generation boom will also be constructed and tested aiming to improve the deployment procedure and the the performance of the boom.

TABLE DES MATIÈRES

	RÉSUMÉ	V
	ABSTRACT	VI
	LISTE DES FIGURES	IX
	LISTE DES TABLEAUX	XI
1	INTRODUCTION	1
2	THÉORIE	4
2.1	Description	4
2.2	Moments de forces qui s'exercent sur le déflecteur	4
2.3	Importance de l'emplacement du point d'attache	8
2.4	Critères à considérer pour déterminer dans quel sens le déflecteur déviera	8
2.5	Relation entre θ et α en l'absence de glaces	9
2.6	Moment qui détermine le retour d'une estacade déplacée à sa position d'équilibre (moment de rééquilibrage)	17
2.7	Déviation des plaques de glace par le déflecteur	25
2.8	Force de traînée qui s'exerce sur le déflecteur	35
3	EXPÉRIENCES EN LABORATOIRE	41
4	EXPÉRIENCES SUR LE TERRAIN	44
4.1	Conception et construction du prototype	44
4.2	Essais du prototype sur le terrain	44
4.3	Résultats des expériences et comparaison avec les prévisions théoriques	50
5	CONCLUSIONS	55
	BIBLIOGRAPHIE	56

LISTE DES FIGURES

1 Estacade de déviation flottante utilisée par l'industrie des pâtes et papiers (d'après Koroleff et Lazier) 2

2 Configuration théorique du déflecteur 5

3 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la longueur de la partie protectrice 12

4 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par le nombre de segments 13

5 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la longueur de l'espace ménagé entre les segments et les safrans 14

6 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la surface immergée des safrans 15

7 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la profondeur d'immersion des safrans 16

8 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la longueur des safrans 18

9 Angle maximal entre le déflecteur et la direction du courant et angle optimal correspondant entre les safrans et l'estacade pour différentes conditions paramétriques 19

10 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de leur partie protectrice 22

11 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par le nombre de leurs segments 23

12 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de l'espace ménagé entre les segments et les safrans 24

13 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la longueur des safrans 26

14 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la surface immergée des safrans 27

15 Déviation d'une plaque de glace par le prototype 28

16 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de leur partie protectrice d'amont 31

17 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par le nombre de segments 32

18 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de l'espace ménagé entre les segments et les safrans 38

19 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la surface des safrans 34

20 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la longueur des safrans 36

21 Grandeur et direction de la force de traînée qui s'exerce sur le déflecteur 39

22 Détails d'un élément du déflecteur utilisé en laboratoire 42

23 Déflecteur expérimental en action lors des essais en laboratoire 43

24 Prototype destiné aux essais sur le terrain 45

25 Plan de disposition en vue des essais sur le terrain 46

26 Le prototype à l'essai dans la rivière Détroit 48

27 La nappe "d'hydrocarbures fictifs" traverse l'estacade alors que les plaques de glace sont déviées 49

28 Les safrans dirigent la nappe fictive vers la rive 49

29 Comparaison de l'expérience et de la théorie en ce qui concerne la relation entre θ et α 52

30 Relation théorique entre la taille de la plaque de glace déviée et l'angle de fléchissement du prototype 53

LISTE DES TABLEAUX

1 Paramètres utilisés dans l'étude comparative 10

2 Paramètres servant au calcul de la force de traînée totale 38

3 Vitesse du courant à la surface, au moment des essais sur le terrain 47

4 Résultats des essais sur le terrain 51

INTRODUCTION — Chapitre 1

Les hydrocarbures déversés dans des cours d'eau qui charrient des glaces sont très difficiles à récupérer à l'aide des barrières et des appareils classiques. Les glaces brisent les premières et bloquent l'entrée des autres. Il n'est en fait pas facile de circuler avec de petites embarcations parmi les glaces et lorsque le courant est rapide, le risque de chavirer est grand.

Il n'y a pas qu'au printemps que nos rivières charrient des glaces; cela se produit fréquemment en hiver. Tsang a démontré dans une analyse statistique (1975) que les rivières Détroit et Ste-Claire, par exemple, charrient surtout des floes en hiver. L'inventaire des glaces charriées par ces rivières, effectué des airs par Tsang pendant l'hiver 1974 indique que les floes avaient en général une superficie inférieure à celle d'un court de tennis. Certains cependant encombraient la moitié de la rivière, dans le sens de la largeur.

Pour retenir et récupérer des hydrocarbures dans ces conditions, il faut tout d'abord libérer des glaces une partie de la rivière afin de pouvoir utiliser les appareils classiques de récupération. À cette fin, on peut mettre en place une estacade capable de retenir les glaces tout en laissant passer la nappe d'hydrocarbures.

Dans l'étude mentionnée ci-dessus, Tsang a examiné les façons de retenir et de récupérer des hydrocarbures advenant un déversement dans les rivières Détroit et Ste-Claire en hiver. Il propose un déflecteur avec ouvertures faisant angle avec la direction du courant. La nappe peut passer sans difficulté à travers les ouvertures prévues à cette fin, tandis que les glaces sont déviées.

Les conclusions de nombreux travaux nous permettent d'affirmer que même en l'absence de glaces à la dérive, les barrages classiques peuvent difficilement retenir les hydrocarbures lorsque le courant est rapide (Vanderkooy et coll., 1976; Foley et Tresidder, 1977). Par conséquent, il serait souhaitable que le déflecteur suggéré par Tsang puisse non seulement faire dévier la nappe de pétrole vers la rive, où le courant est moins rapide, mais aussi faire dévier les glaces. Cela faciliterait la récupération des hydrocarbures et résoudrait le problème des glaces à la dérive.

En plus d'être inefficaces lorsque le courant est rapide, les estacades classiques sont difficiles à installer car elles doivent être ancrées aux deux extrémités, et même en des points intermédiaires parfois. L'idéal serait donc de disposer d'une estacade ne nécessitant qu'un seul point d'amarrage, de préférence sur la rive.

L'industrie des pâtes et papiers utilise depuis longtemps des estacades flottantes pour diriger le bois à pâte dans le chenal approprié (Koroleff, 1932; Lazier, 1964) (voir figure 1). Comme on peut le remarquer sur la figure 1, ce type d'estacade ne s'amarre qu'en un seul point, en amont sur la rive. Sous l'action du courant, les safrans entraînent l'estacade dans le courant et l'y maintiennent. On peut varier l'angle de l'estacade en modifiant l'angle des safrans. Les billes sont donc retenues par l'estacade et dirigées dans la direction voulue.

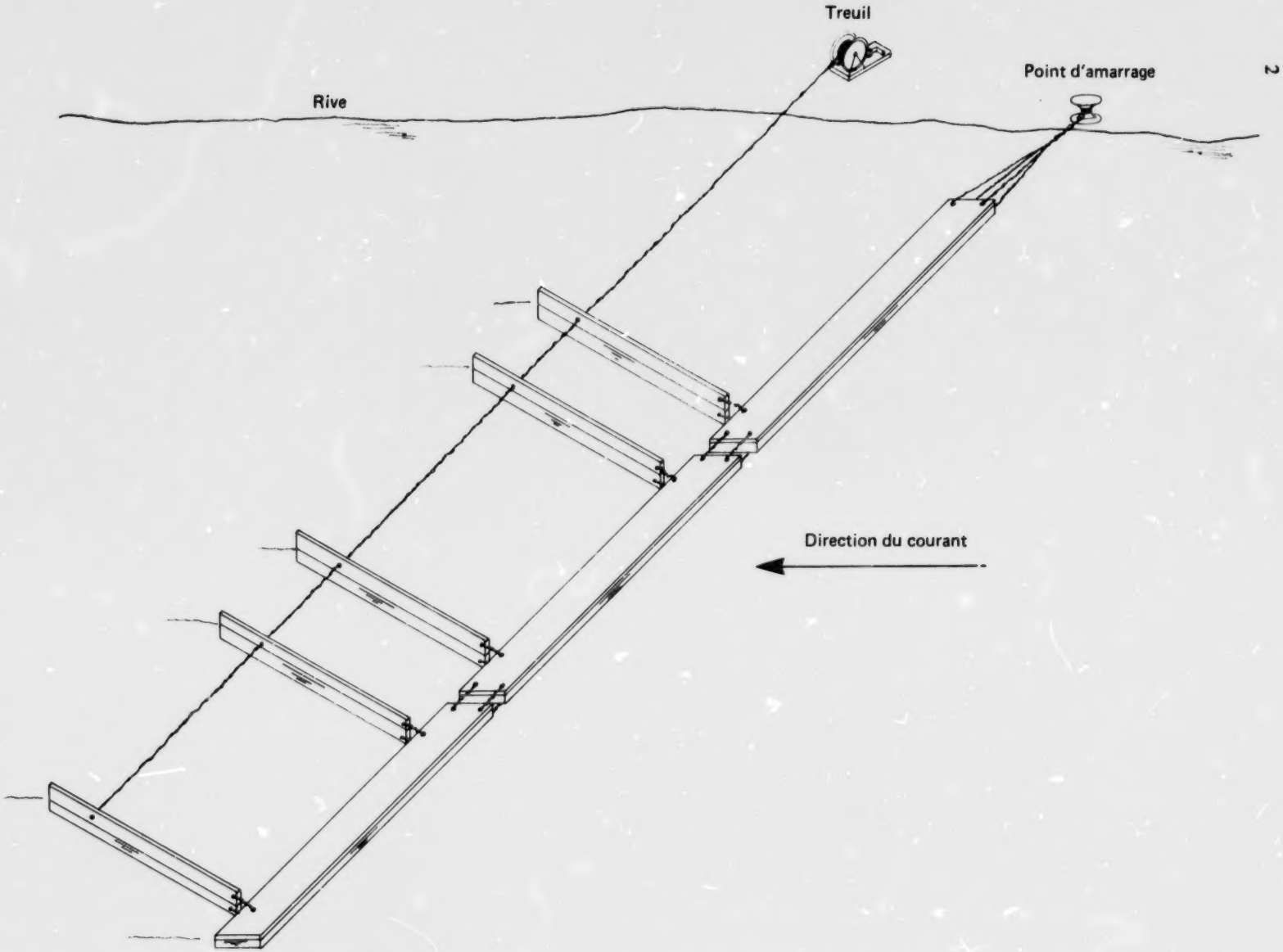


FIGURE 1 Estacade de déviation flottante utilisée par l'industrie des pâtes et papiers (d'après Koroleff et Lazier)

Une rivière qui charrie des glaces peut se comparer à une rivière servant au flottage. L'estacade décrite plus haut conviendrait donc pour dévier les glaces. Si des ouvertures sont pratiquées dans l'estacade, le pétrole peut s'échapper et arriver dans un plan d'eau libre de glaces, en aval. Après s'être engouffré par les ouvertures, le courant se heurte aux safrans et sera dévié vers la rive en entraînant la nappe de pétrole vers le rivage, dans un endroit propice à sa récupération.

La résistance au choc de l'estacade est une caractéristique très recherchée: si un très gros bloc de glace vient heurter l'estacade, celle-ci est simplement poussée vers la rive au lieu de se briser, puis elle reprend sa position.

Mentionnons que c'est aussi en s'inspirant de l'estacade à bois que Brodsky et coll. (1977) ont mis au point des safrans s'adaptant à une estacade classique. Il s'agit en fait de palettes qui s'attachent individuellement aux estacades classiques et les transforment en dispositif de déviation. Une telle estacade ne s'amarre qu'en un seul point, soit en amont sur la rive, et permet de faire dériver la nappe d'hydrocarbures à l'endroit propice à sa récupération.

La déviation de nappes d'hydrocarbures vers la rive grâce à la déviation du courant de surface à l'aide de déflecteurs spéciaux avait aussi été envisagée par Eryuzlu et Hausser (1977). Il s'agissait, en l'occurrence, de plusieurs déflecteurs profilés en aile d'avion et en partie submergés, reliés par une structure rigide amarrée solidement sur la rive. Ces déflecteurs devaient s'établir d'eux-mêmes une fois entraînés par le courant, et faire dévier le courant et la nappe d'hydrocarbures vers la rive. Une étude de ces déflecteurs par modélisation reproduisant les conditions du St-Laurent, a démontré que l'on ne pouvait obtenir les résultats escomptés qu'à condition de faire dévier une épaisse couche d'eau (plusieurs mètres), ce qui nécessiterait d'immenses déflecteurs reliés à de solides structures d'amarrage.

L'industrie du bois utilise des estacades de déviation flottantes depuis plusieurs années déjà. Nous n'avons cependant trouvé aucune analyse vraiment complète. Ce rapport traitera donc pour commencer des aspects théoriques du déflecteur flottant que nous proposons pour faire dévier une nappe d'hydrocarbures dans une rivière charriant des glaces. Il sera ensuite question des essais effectués sur le terrain avec un prototype construit à la suite des études théoriques préparatoires et des études sur modèle. Les résultats des essais effectués avec le prototype sont comparés aux prévisions des études théoriques. Il sera question, pour terminer, des améliorations qui semblent s'imposer à la suite des premiers essais.

THÉORIE Chapitre 2

Les estacades de déviation* utilisées par l'industrie des pâtes et papiers sont constituées de plusieurs sections reliées les unes aux autres avec un câble ou des chaînes (voir fig. 1). Si une estacade aussi flexible convient pour faire dévier les billes, elle se déforme par contre trop sous l'impact de grosses plaques de glace, comme l'ont montré les essais en laboratoire et sur le terrain. Si on veut adapter ce genre d'estacade pour faire dévier des glaces, les sections devront par conséquent être reliées rigidement.

2.1 Description

Pour éviter tout malentendu, nous tenons à préciser que dans le texte qui suit *déflecteur* désigne le dispositif de déviation des glaces et de la nappe de pétrole au complet. Le déflecteur est constitué de N *éléments*, chaque élément comprenant un *segment* d'estacade (L_b sur fig. 2) et un *safran* (L_f sur fig. 2). L'ensemble des segments constituent *l'estacade* (L_e sur fig. 2).

Le point d'attache du safran au segment est à une distance L_a en partant de l'amont du segment. Un espace est laissé entre le segment et le safran afin de créer une zone d'accalmie. Cet espace est représenté par L_g sur la figure 2.

Précisons encore qu'à la suite des premiers essais effectués sur le terrain, il a été décidé de supprimer le safran du premier segment (L_u sur la fig.2) constamment endommagé par les glaces se faufilant entre la rive et le point A de l'estacade.

2.2 Moments des forces qui s'exercent sur le déflecteur

La figure 2 montre le déflecteur proposé, poussé vers la gauche par le courant. On peut voir que pour un angle α entre les safrans et l'estacade, l'angle d'équilibre de cette dernière est θ.

Dans notre analyse, nous avons supposé

i) que la force de traînée qui s'exerce sur l'estacade et les safrans résulte seulement de la composante normale de la vitesse;

ii) que pour chaque élément, la force de traînée de l'estacade s'applique au centre du segment et la force de traînée du safran s'applique au centre du safran;

iii) que les safrans n'influent pas sur la tenue (les caractéristiques) hydraulique de l'estacade, ou vice versa.

*Appelées aussi estacades flottantes multiples, estacades à nageoires.

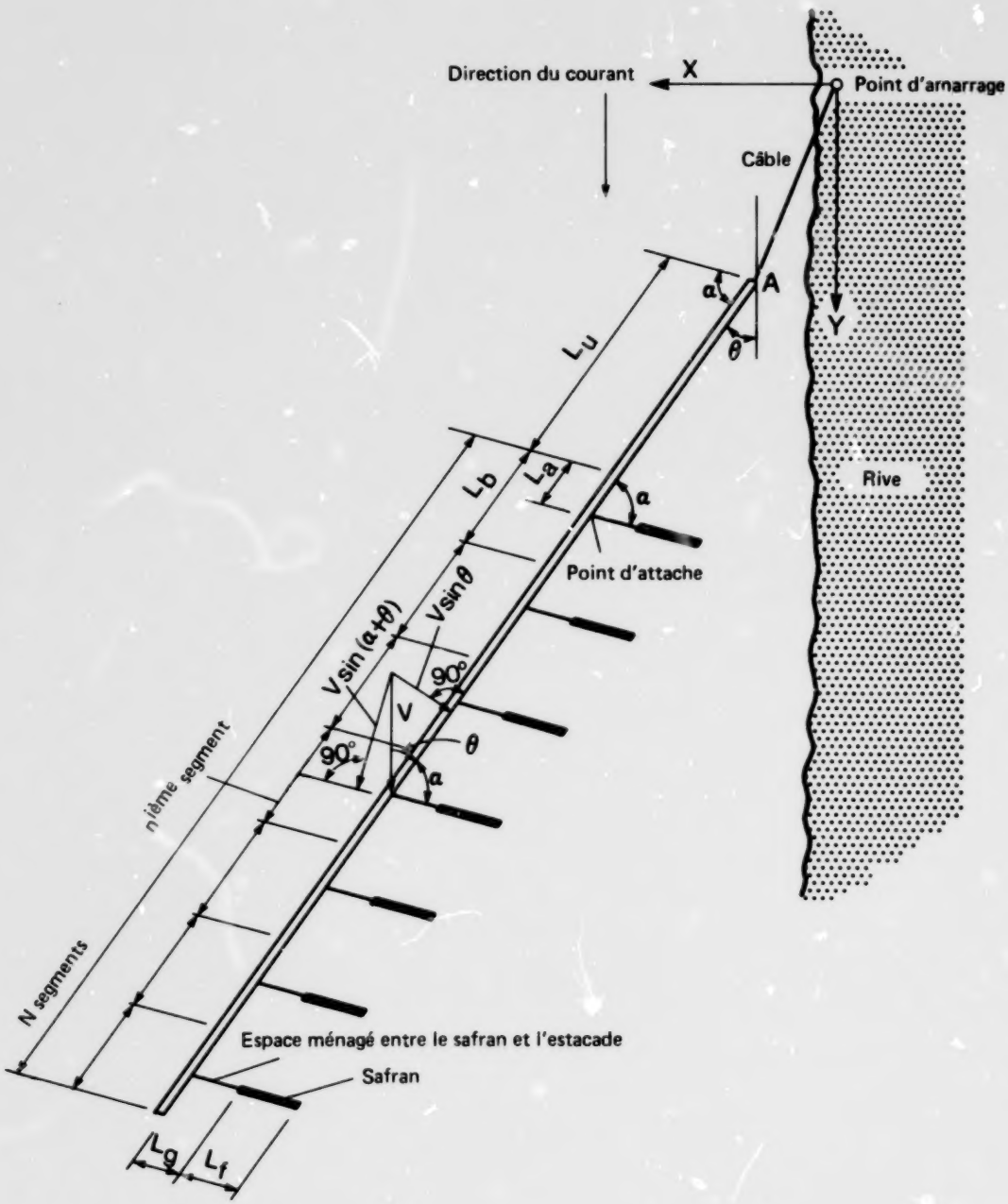


FIGURE 2 Configuration théorique du déflecteur

Cela dit, le moment induit par la force de traînée appliquée sur le nième segment par rapport à l'extrémité amont de l'estacade (point A) peut s'exprimer comme suit:

$$m_{bn} = \left(\frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sin^2 \theta A_b\right) L_b \left(\frac{L_u}{L_b} + n - \frac{1}{2}\right) \quad (1)$$

où
- C_D = le coefficient de traînée
- ρ = la masse volumique de l'eau
- V = la vitesse du courant
- A_b = la projection de la surface immergée de l'estacade sur un plan perpendiculaire au vecteur vitesse.

Le premier terme de l'équation entre parenthèses est la force de traînée qui s'exerce sur le segment. La même équation peut être formulée pour tous les autres éléments. La sommation des moments pour l'ensemble des éléments (L_e) donne

$$\sum_{n=1}^{N} m_{bn} = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sin^2 \theta A_b L_b \left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{N}{2}\right) N \quad (2)$$

Le moment de la force de traînée qui s'exerce sur le segment de l'estacade dépourvu de safran (L_u) par rapport à A donne

$$m_{bu} = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sin^2 \theta A_b L_b \left(\frac{1}{2} \frac{A_u L_u}{A_b L_b}\right) \quad (3)$$

où
- A_u = la projection de la surface immergée de ce segment sur un plan perpendiculaire au vecteur vitesse.

La somme des équations 2 et 3 donne le moment total M_b qui s'exerce sur l'estacade au point A. Si la valeur M_b est normalisée par l'équation 4

$$M_{b_*} = \frac{M_b}{\frac{1}{2} C_D \rho V^2 A_b L_b} \quad (4)$$

il peut être démontré que

$$M_{b_*} = \sin^2 \theta \left[\frac{L_u}{L_b} \left(\frac{1}{2} \frac{A_u}{A_b} + N\right) + \frac{N^2}{2}\right] \quad (5)$$

Selon la théorie de la mécanique, le moment de la force de traînée qui s'exerce sur le safran du nième élément par rapport au point A peut s'exprimer de la façon suivante:

$$m_{fn} = -\left[\frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sin^2(\alpha+\theta) A_f\right] (L_g + \frac{1}{2} L_f) + \left[\frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sin^2(\alpha+\theta) A_f\right](L_u + (n-1) L_b + L_a) \cos\alpha \quad (6)$$

où A_f = la surface immergée du safran.

Le terme entre crochets correspond à la force de traînée appliquée sur le safran. Le premier terme du membre de droite de l'équation est le moment de la force de traînée appliquée sur le safran dans le sens de rotation des aiguilles d'une montre (sens rétrograde), à son point d'attache, le deuxième terme du membre de droite de l'équation étant le moment de la force de traînée appliquée dans le sens inverse de rotation des aiguilles d'une montre (sens direct) considérée maintenant comme étant la force agissante au point d'attache, par rapport au point A. La même équation vaut pour chacun des N safrans. La sommation de tous les moments et la normalisation subséquente du moment obtenu à l'aide du dénominateur de l'équation 4, donnent le moment non dimensionnel de la force de traînée appliquée sur les safrans:

$$M_{f_*} = \sin^2(\alpha+\theta) \frac{A_f}{A_b} N \left[\left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{L_a}{L_b} + \frac{N-1}{2}\right) \cos\alpha - \left(\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}\right)\right] \quad (7)$$

Les équations 5 et 7 postulent que le courant pousse le déflecteur vers la gauche lorsqu'on regarde vers l'aval. Il peut arriver cependant que le déflecteur soit poussé vers la droite. Dans ce cas, deux équations semblables peuvent être dérivées. En admettant que l'angle entre le déflecteur et la direction du courant est positif si le déflecteur est poussé vers la gauche, et négatif si il est poussé vers la droite, ces deux équations peuvent être incorporées aux équations 5 et 7 pour donner:

$$M_{b_*} = \pm \sin^2(\pm\theta) \left[\frac{L_u}{L_b}\left(\frac{1}{2} \frac{A_u}{A_b} + N\right) + \frac{N^2}{2}\right] \quad (8)$$

$$M_{f_*} = \sin^2(\alpha+\theta) \frac{A_f}{A_b} N \left[\left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{L_a}{L_b} + \frac{N-1}{2}\right) \cos\alpha - \left(\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}\right)\right] \quad (9)$$

Dans l'équation 8, on utilisera le signe + ou −, dépendant si l'angle entre le déflecteur et la direction du courant est positif ou négatif. Dans cette équation, on écrit $\mathrm{Sin}^2(\pm\theta)$ de préférence à $\mathrm{Sin}^2\theta$ de manière à ne pas masquer sa véritable configuration mathématique en vue des opérations mathématiques subséquentes.

2.3 Importance de l'emplacement du point d'attache

Pour que les safrans soient protégés des glaces par l'estacade, il faut que le déflecteur soit poussé vers la gauche par le courant. Tel que mentionné précédemment, les essais ont montré que la première partie de l'estacade ne devrait pas comporter de safrans, ce qui donne $A_u/A_b = L_u/L_b$. Dans ces conditions, l'équation 8 devient:

$$M_{b_*} = \mathrm{Sin}^2\theta \left[\frac{L_u}{L_b} \left(\frac{1}{2} \frac{L_u}{L_b} + N \right) + \frac{N^2}{2} \right] \tag{10}$$

Ce moment est toujours positif pour réduire l'angle θ et il est indépendant de l'angle α.

Pour ce qui est de M_{f_*} on voit, d'après l'équation 9 et la figure 2, qu'il se décompose en deux. La première partie sert à réduire l'angle θ lorsque $\alpha<90^o$ (moment direct) et à l'augmenter lorsque $\alpha>90^o$ (moment rétrograde) tandis que la deuxième partie sert toujours à augmenter l'angle θ (moment rétrograde). Comme le déflecteur qui nous intéresse a pour fonction première d'empêcher le passage des glaces, il doit pouvoir se placer le plus possible en travers du courant, et il faut pour cela que l'angle α du safran avec l'estacade soit supérieur à 90^o.

En étudiant l'équation 9 on constate que lorsque $\alpha>90^o$, le moment qui permet d'augmenter θ augmente lorsque L_a/L_b augmente. Si l'on cherche le moment rétrograde maximal la valeur de L_a/L_b sera elle aussi maximale c'est-à-dire, qu'elle sera égale à 1. Cela signifie que le point d'attache du safran sera situé à la toute fin du segment.

2.4 Critères à considérer pour déterminer dans quel sens le déflecteur déviera

En conditions d'équilibre et en l'absence de glaces, nous avons:

$$M_{b_*} + M_{f_*} = 0 \tag{11}$$

En remplaçant cette équation par les équations 8 et 9, en admettant que $L_a/L_b = 1$, nous obtenons:

$$\mathrm{Sin}^2(\pm\theta)\left[\frac{L_u}{L_b} \left(\frac{1}{2} \frac{L_u}{L_b} + N \right) + \frac{N^2}{2} \right]$$
$$= \mathrm{Sin}^2(\alpha+\theta) \frac{A_f}{A_b} N \left[\pm \left(\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b} \right) \mp \left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2} \right) \mathrm{Cos}\,\alpha \right] \tag{12}$$

en utilisant les signes en position supérieure lorsque $\theta>0$ et les signes en position inférieure lorsque $\theta<0$.

Comme d'après l'équation 12 le membre de gauche est toujours positif, et le terme hors crochets du membre de droite est également positif, on obtient:

$$\left[\left(\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}\right) - \left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2}\right)\cos\alpha\right] > 0; \text{ si } \theta > 0 \qquad (13)$$

et

$$\left[-\left(\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}\right) + \left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2}\right)\cos\alpha\right] > 0; \text{ si } \theta < 0 \qquad (14)$$

ce que nous pouvons reformuler comme suit:

$$\text{Cos}\,\alpha < \frac{\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}}{\frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2}}; \text{ si } \theta > 0 \qquad (15)$$

et

$$\text{Cos}\,\alpha > \frac{\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}}{\frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2}}; \text{ si } \theta < 0 \qquad (16)$$

Ces inégalités nous permettent de définir la valeur de l'angle α si l'on veut que le courant fasse dévier le déflecteur vers la gauche ou vers la droite.

Comme Cos α ne peut jamais être supérieur à l'unité, l'équation 16 ne peut jamais être résolue lorsque:

$$\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b} > \frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2} \qquad (17)$$

et dans de telles conditions, le courant fera forcément dévier le déflecteur vers la gauche.

2.5 Relation entre θ et α en l'absence de glaces

En tenant compte des discussions en 2.4, on peut réécrire l'équation 12 pour obtenir:

$$\theta = \pm\text{Cot}^{-1}\left\{\frac{1}{\text{Sin}\,\alpha}\left[\frac{\frac{L_u}{L_b}\left(\frac{1}{2}\frac{L_u}{L_b} + N\right) + \frac{N^2}{2}}{\frac{A_f}{A_b}N\left[\pm\left(\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}\right) \mp \left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2}\right)\text{Cos}\,\alpha\right]}\right]^{\frac{1}{2}} - \text{Cot}\,\alpha\right\} \qquad (18)$$

en utilisant les signes en position supérieure lorsque l'équation 15 s'applique et les signes en position inférieure lorsque c'est l'équation 16 qui s'applique. À partir de l'équation 18, il est possible de calculer et de tracer des courbes de θ en fonction de α.

L'équation 18 contient cinq paramètres: L_u/L_b, N, L_g/L_b, A_f/A_b et L_f/L_b. Pour en étudier les effets sur le courbe de θ en fonction de α, nous utilisons les diverses valeurs qui paraissent au tableau 1. Les valeurs soulignées sont celles jugées techniquement acceptables et qui ont été utilisées pour tracer la courbe de référence. Pour étudier les effets d'un paramètre donné, on utilise une à une les diverses valeurs données au tableau 1 pour le paramètre en question en gardant la valeur de référence pour les autres paramètres, et on compare les différentes courbes obtenues.

Tableau 1 Paramètres utilisés dans l'étude comparative

L_u/L_b	0	1	<u>2</u>	3	4	5		
N	2	4	6	8	10	<u>12</u>	15	20
L_g/L_b	0	0,1	<u>0,2</u>	0,3	0,4	0,5	1,0	
L_f/L_b	0,5	<u>0,8</u>	1,2	1,4	1,6			
A_f/A_b	0,5	<u>0,8</u>	1,0	1,2	1,4	1,6		
H_f/H_b	<u>1,0</u>	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0		

Il est possible de remplacer le paramètre A_f/A_b par $(H_f/H_b)(L_f/L_b)$, où H_f est la profondeur d'immersion du safran et H_b est la profondeur d'immersion de l'estacade. À cause des ouvertures qui sont pratiquées dans l'estacade, la valeur de H_b sera moins grande que la profondeur d'immersion réelle de l'estacade. Comme L_f/L_b constitue déjà un paramètre, H_f/H_b remplace dans ce cas A_f/A_b, et on se servira des valeurs données dans le tableau 1 pour étudier les effets de ce paramètre.

À partir de l'équation 18 et des valeurs données dans le tableau 1, nous avons calculé et tracé les courbes de θ en fonction de α, pour différentes conditions paramétriques (voir figures 3 à 8).

Influence de L_u/L_b

La figure montre les courbes obtenues selon la valeur donnée à L_u/L_b. On remarque qu'elles ont toutes la forme d'un S couché. Leur examen nous fait voir que dans ces conditions, un déflecteur s'oriente dans le sens du courant lorsque les safrans sont complètement ouverts à 180°. À mesure qu'on réduit l'angle d'ouverture des safrans, le déflecteur se déplace vers la gauche, dans le courant, jusqu'à ce qu'il atteigne un angle maximal. Si on continue à réduire l'angle d'ouverture des safrans, l'angle θ se réduit lui aussi jusqu'à atteindre la valeur 0. Passé ce point le déflecteur se déplacera vers la droite. Il est intéressant de noter que d'après ces courbes, le déflecteur ne reviendra à sa position initiale qu'après avoir atteint l'angle maximal vers la droite. Lorsque l'angle des safrans est complètement fermé, le déflecteur se replace dans le sens du courant.

Les courbes de la figure 3 diffèrent peu l'une de l'autre. On remarque qu'on obtient de plus grandes valeurs de θ_{max} lorsque les valeurs de L_u/L_b sont plus petites. Cependant, même si l'allongement de la partie protectrice L_u a tendance à réduire l'angle maximal du déflecteur par rapport à la direction du courant (pour les valeurs examinées tout au moins), un tel effet est en pratique insignifiant. Pour un déflecteur dont la partie protectrice serait cinq fois plus longue qu'un segment, l'angle maximal du déflecteur par rapport à la direction du courant est d'environ 24^o, alors que pour un déflecteur ne comportant pas de partie protectrice, la différence est à peine de 2^o.

Influence du nombre de N

La figure 4 montre les courbes obtenues pour les différentes valeurs de N, leur forme générale s'apparente à celles de la figure 3, mais elles diffèrent cependant plus les unes des autres, notamment lorsque α est petit. Par contre, elles coïncident presque dans la partie de la courbe qui présente un intérêt pratique, entre $\alpha = 180^o$ et le point où θ est maximal. Ainsi, nous pouvons conclure que dans les conditions étudiées, tout au moins, le nombre d'éléments a peu d'influence sur la tenue hydraulique d'un déflecteur.

Influence de L_g/L_b

La figure 5 présente les courbes pour différents rapports L_g/L_b. Là encore, ces courbes ont la même forme générale que celles des figures 3 et 4. Même si on constate qu'aux valeurs de L_g/L_b les plus élevées correspondent les valeurs de θ_{max} les plus grandes, la différence de θ_{max} entre les plus petites et les plus grandes valeurs de L_g/L_b n'est que de 3^o environ. Pour la partie de la courbe qui présente un intérêt pratique, entre $\theta = 180^o$ et θ_{max}, les courbes se rejoignent presque. La figure 5 nous permet donc de conclure que ce n'est pas en augmentant l'espace ménagé entre l'estacade et les safrans qu'on parviendra à augmenter l'angle entre le déflecteur et la direction du courant.

Influence de A_f/A_b et H_f/H_b

Les figures 6 et 7 ont trait au même effet paramétrique mais abordé de façon différente. Dans la figure 6, on utilise le rapport de la surface immergée A_f/A_b et dans la figure 7, le rapport de la profondeur d'immersion H_f/H_b, en attribuant dans chaque cas la valeur 0,8 à L_f/L_b.

Les deux figures nous font voir que pour une longueur de safran donnée, la surface immergée ou la profondeur d'immersion des safrans influe beaucoup sur la tenue hydraulique du déflecteur. Par exemple, lorsque la surface immergée ou la profondeur d'immersion est doublée, l'angle maximal de l'estacade (θ_{max}) augmente de près de 7^o. La partie inférieure gauche des courbes montre que lorsque la surface immergée des safrans (ou leur profondeur d'immersion) dépasse une certaine valeur critique, il n'y a pas de déviation maximale du déflecteur vers la droite (θ_{min}). Le déflecteur continuera à se déplacer graduellement vers la gauche à mesure que l'on réduit l'angle entre les safrans et l'estacade. Théoriquement, lorsque les safrans sont complètement rabattus sur l'estacade, le déflecteur devrait pointer vers l'amont, ce qui est évidemment impossible en pratique car il se trouverait en équilibre précaire, un peu comme une aiguille qui reposerait sur sa pointe. L'équilibre serait rompu au moindre changement du courant et le déflecteur dévierait vers l'aval. Un déflecteur déviant vers la droite ou alors

(suite à la p. 17)

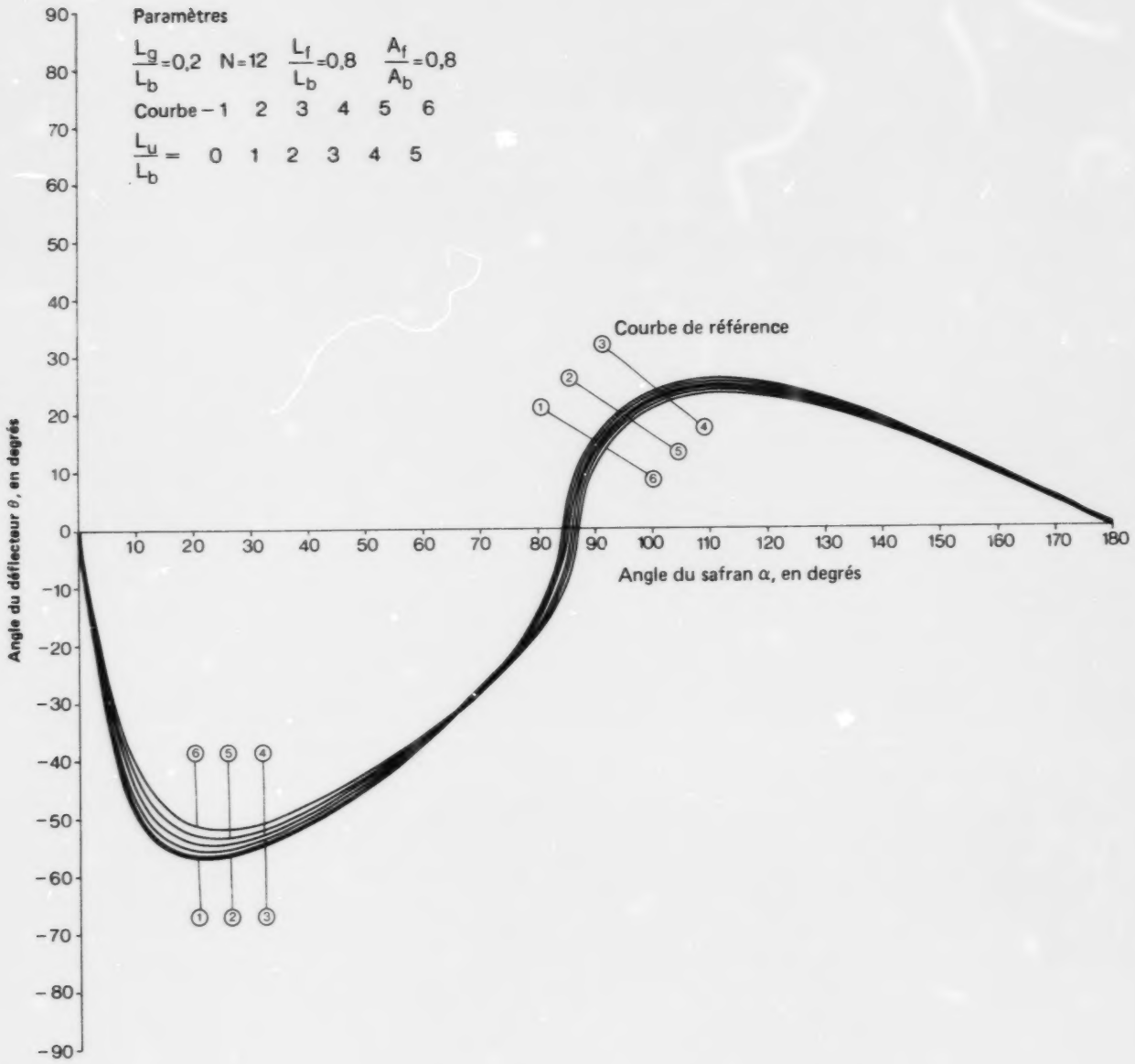


FIGURE 3 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la longueur de la partie protectrice

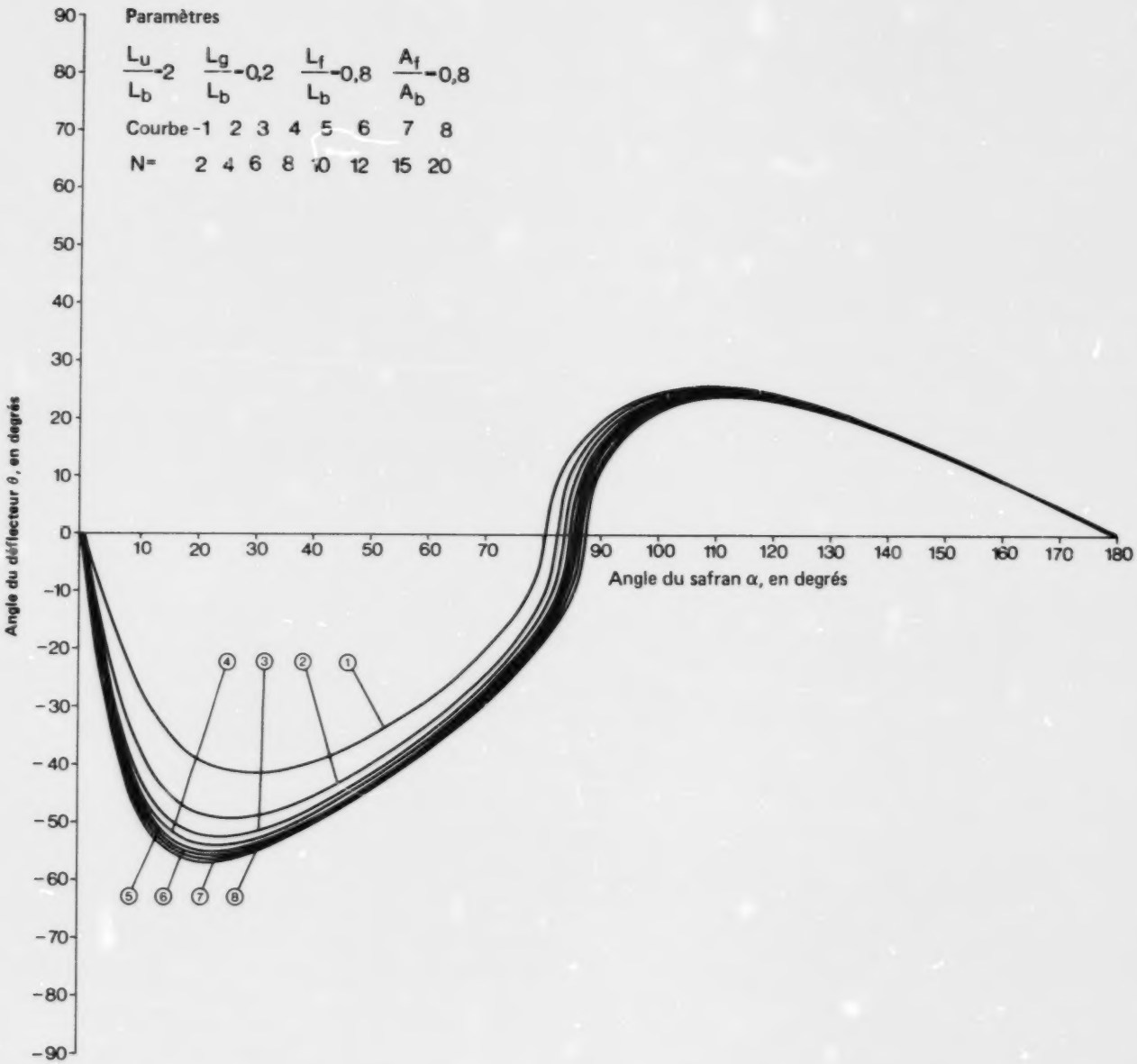


FIGURE 4 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par le nombre de segments

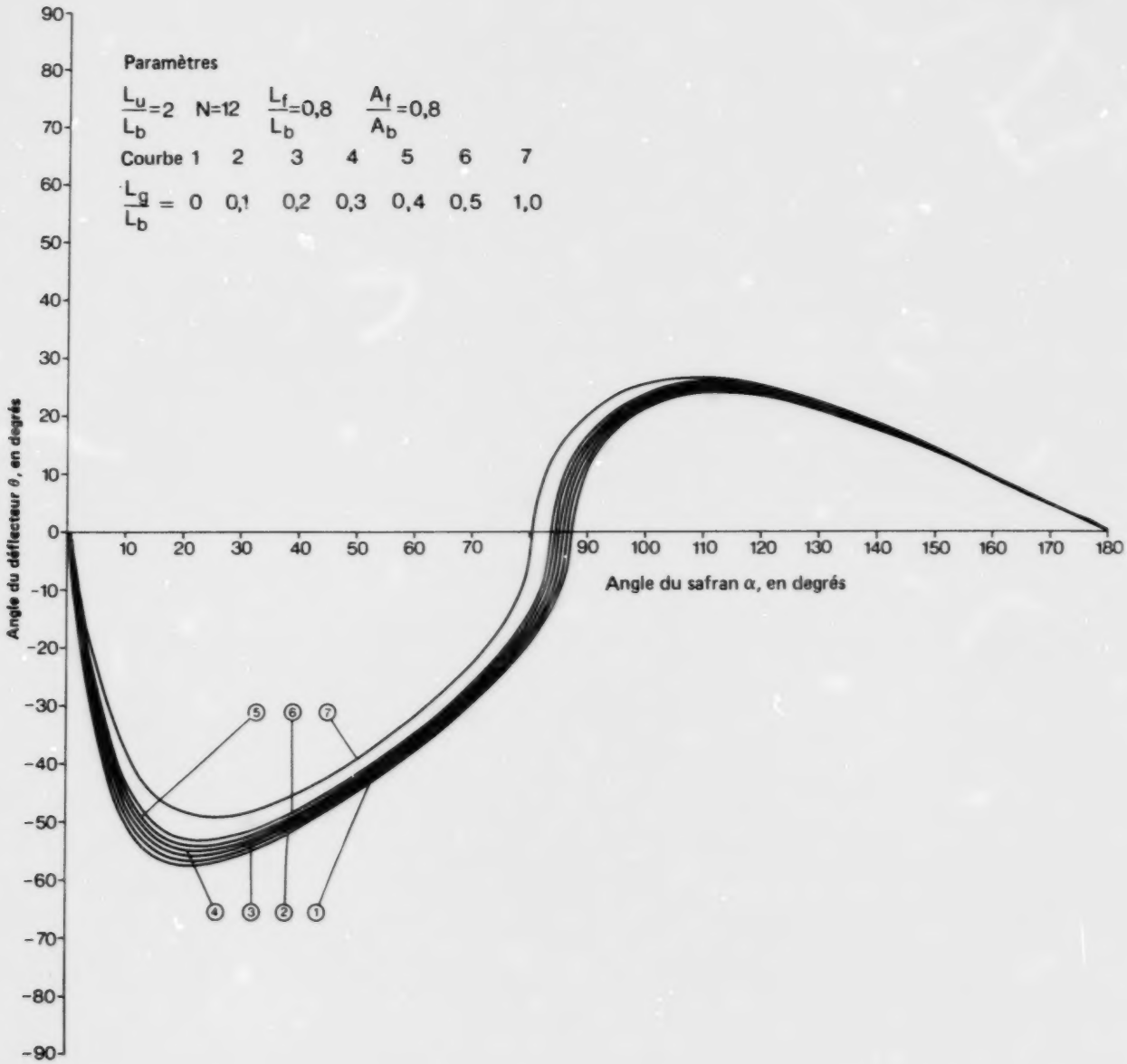


FIGURE 5 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la longueur de l'espace ménagé entre les segments et les safrans

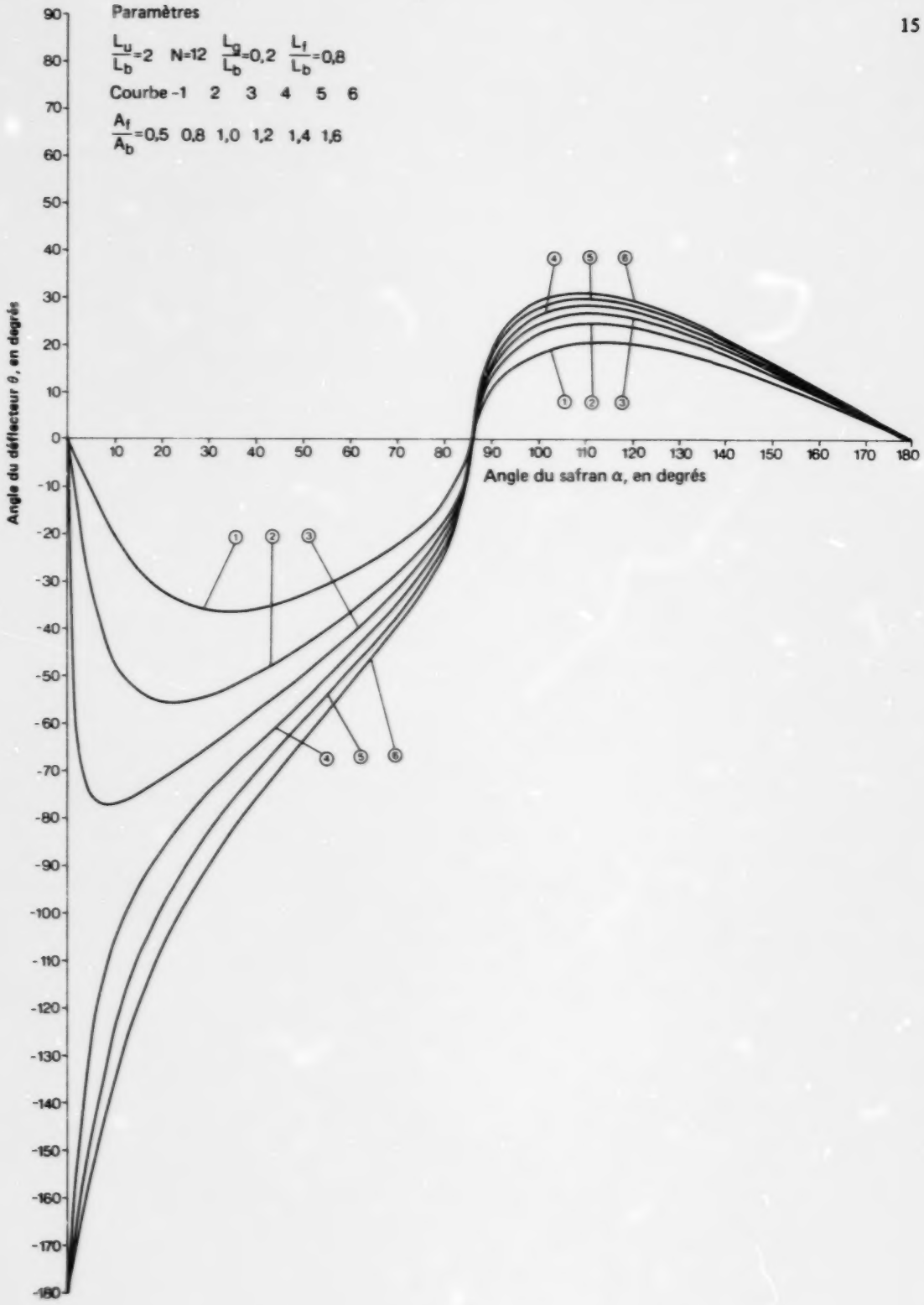


FIGURE 6 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la surface immergée des safrans

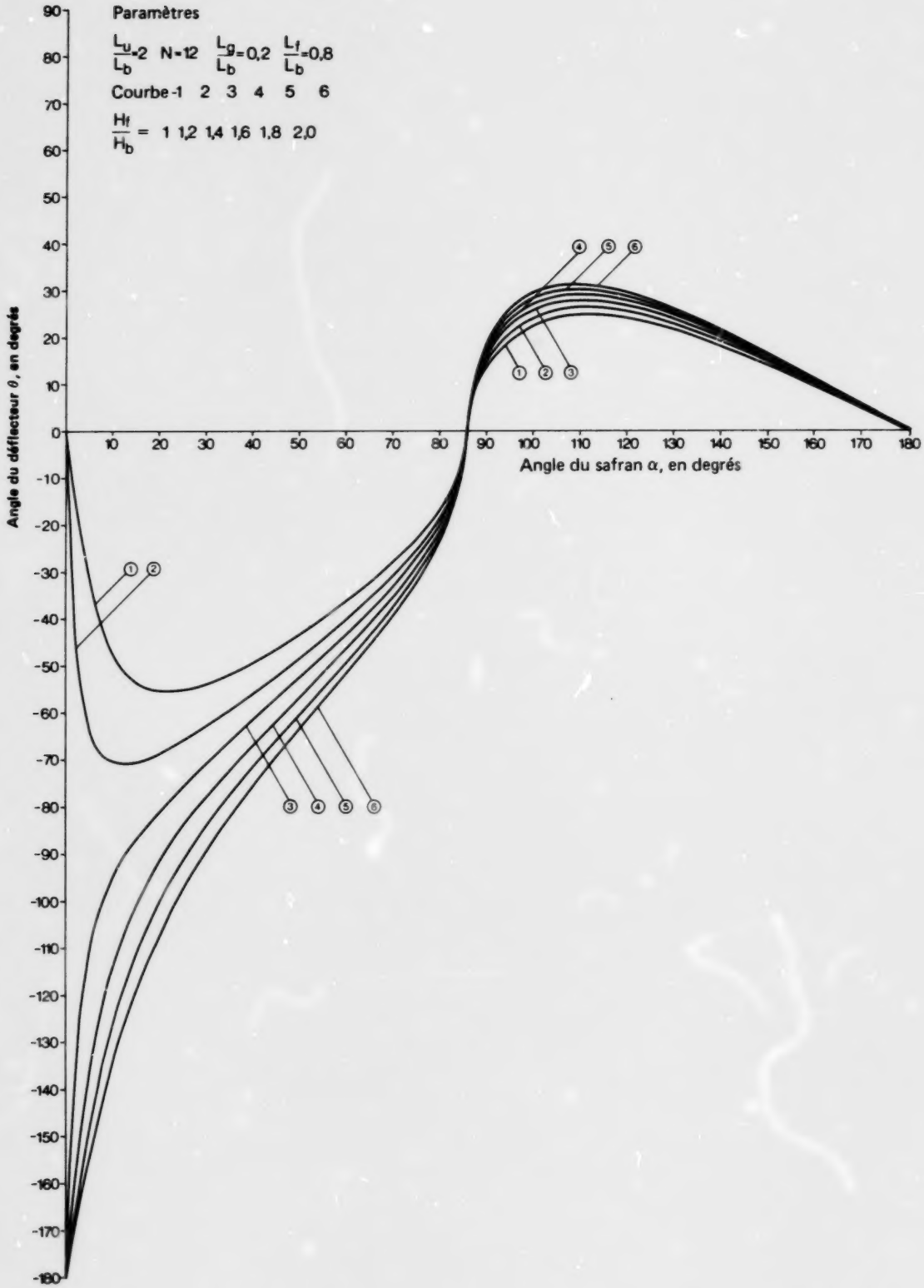


FIGURE 7 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la profondeur d'immersion des safrans

constamment vers la gauche, tel qu'illustré par la partie inférieure gauche des courbes des figures 6 et 7, n'est évidemment d'aucun intérêt pratique pour faire dévier les glaces et récupérer les hydrocarbures dans une rivière.

Influence de L_f/L_b

La figure 8 montre les courbes obtenues selon la valeur choisie pour L_f/L_b, en accordant au rapport des profondeurs d'immersion (H_f/H_b) une valeur constante de 1. On remarque qu'elles ont une forme semblable à celle des figures 6 et 7, ce qui n'est pas surprenant puisqu'elles illustrent l'effet de l'augmentation de la surface immergée des safrans sur l'angle que fait le déflecteur avec la direction du courant. On constate en comparant la partie supérieure des courbes des figures 7 et 8 qu'il est préférable d'augmenter la surface immergée d'un safran en augmentant sa longueur que d'augmenter sa profondeur d'immersion. Par exemple, la comparaison des courbes 2 et 5 de la figure 8 montre que lorsque la surface immergée du safran est doublée en partant de la valeur de L_f/L_b de 0,8 à 1,6, l'angle maximal θ augmente d'un peu plus de 8^o. Si l'on double la surface immergée des safrans en doublant la profondeur d'immersion de l'estacade, l'angle θ_{max} augmente de 7^o à peine (voir fig. 7).

En étudiant les figures 3 à 8, il semblerait préférable de mettre le déflecteur à l'eau avec les safrans complètement ouverts. En refermant graduellement ceux-ci, le déflecteur s'orienterait de lui-même dans le courant après avoir atteint l'angle θ_{max}. Le tracé pratiquement rectiligne des courbes de θ en fonction de α, lorsque l'angle α est grand, signifie que l'augmentation de la valeur de l'angle θ est presque proportionnelle au changement de l'angle α. Une telle caractéristique faciliterait évidemment le fonctionnement du déflecteur. Le tracé des courbes est aussi passablement rectiligne près de θ_{max}. Ceci signifie que lorsque l'angle α s'approche de α_{max}, l'angle θ_{max} ne varie pas lorsque l'angle optimal α est modifié. Sur le terrain, où il est difficile de régler les angles avec précision, une telle caractéristique est précieuse.

Afin de mieux juger de l'effet de chacun des paramètres sur l'angle θ_{max} et l'angle optimal α_{max}, nous présentons, à la figure 9 une série de tracés de θ_{max} et de α_{max} en fonction de: L_u/L_b, N, L_g/L_b, A_f/A_b, H_f/H_b et L_f/L_b. Cette figure confirme que L_u/L_b, N ou L_g/L_b n'ont que peu d'influence sur l'angle θ_{max}. Même si θ_{max} augmente lorsque la surface immergée des safrans est accrue (soit en augmentant leur profondeur d'immersion ou leur longueur), cette augmentation est modérée et presque linéaire. Les graphiques de la figure 9 font voir que dans le cas d'un déflecteur de dimensions normales, on peut s'attendre à ce que l'angle maximal θ atteigne environ 30^o, pour un angle optimal α d'environ 110^o.

2.6 Moment qui détermine le retour d'une estacade déplacée à sa position d'équilibre (moment de rééquilibrage)

Nous venons de voir que, pour une série de paramètres de valeur donnée, il existe toujours un angle α_{max} optimal entre les safrans et l'estacade, lequel déterminera l'angle θ_{max}. En pratique un déflecteur devrait donc être installé de manière à ce que les safrans forment un angle α_{max} avec l'estacade et que cette dernière forme un angle θ_{max} avec le courant.

Si, pour une raison ou pour une autre, l'angle du déflecteur revient à θ, cela donne lieu à un moment de rééquilibrage, c'est-à-dire un retour à une position où $\theta = \theta_{max}$. Ce moment est induit par les changements survenus dans les moments qui s'exercent sur l'estacade et les safrans.

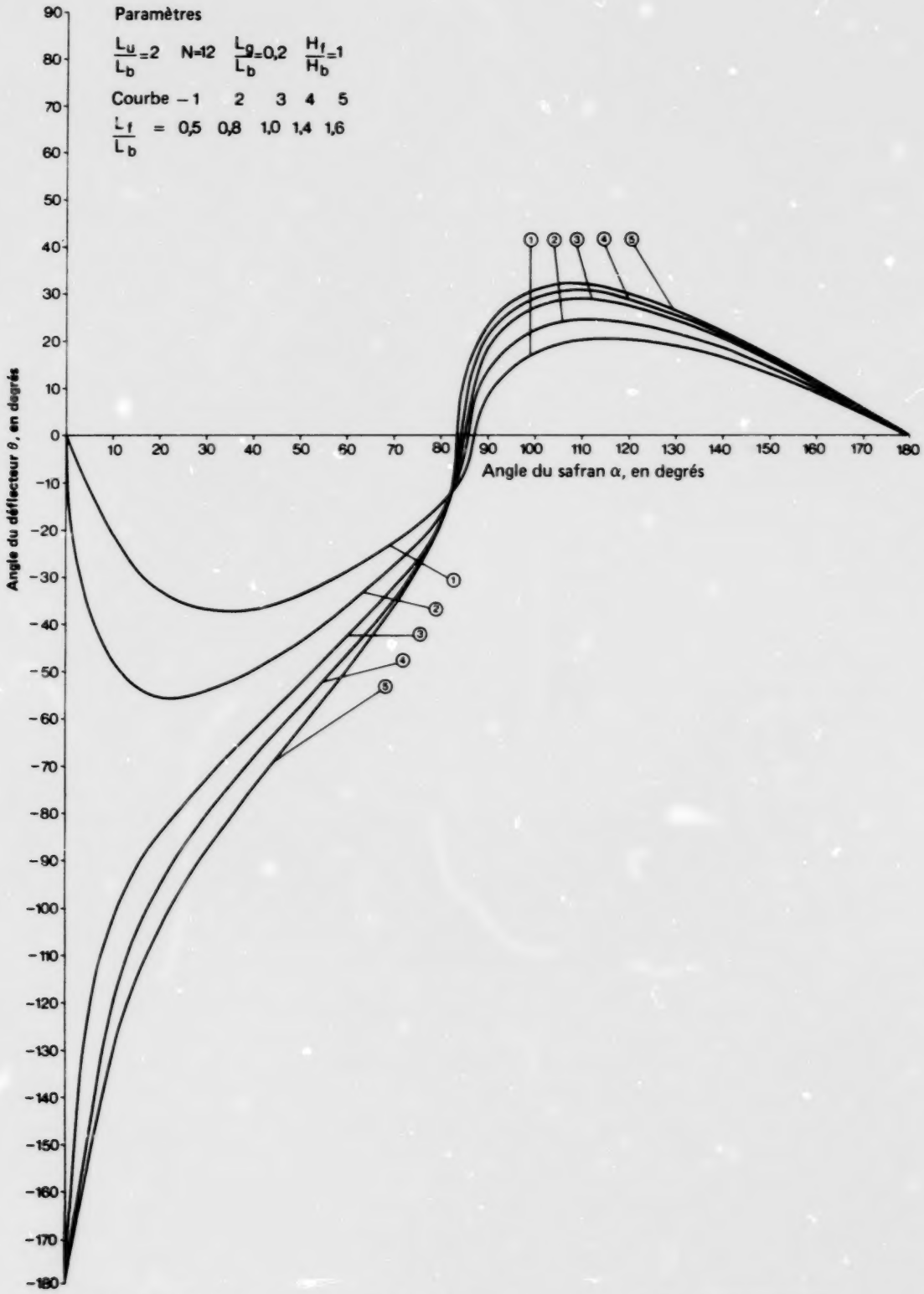
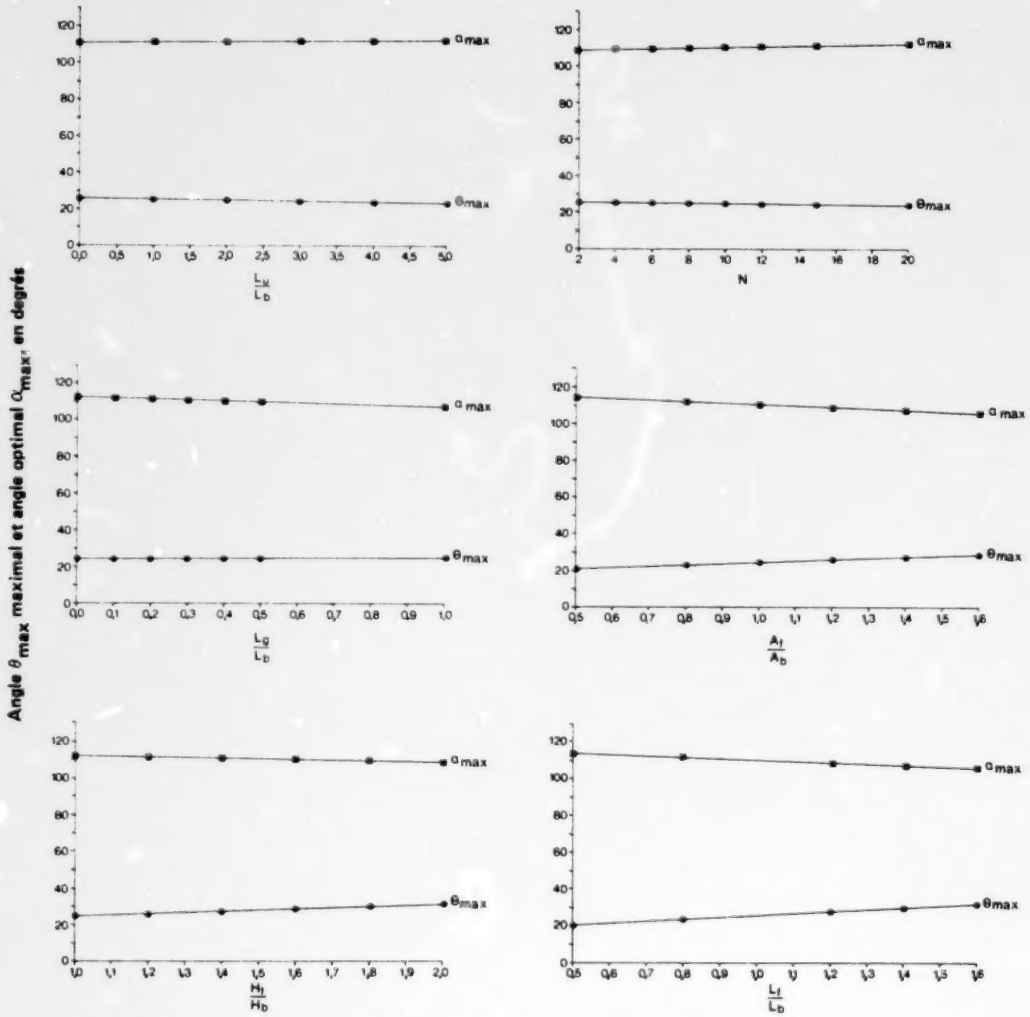


FIGURE 8 Relation entre θ et α pour des déflecteurs qui diffèrent par la longueur des safrans



NOTA: À moins d'indication contraire, les paramètres sont fixes et ont la valeur suivante:

$\frac{L_M}{L_b}$=2,0 . N=12 . $\frac{L_g}{L_b}$=0,2 . $\frac{A_f}{A_b}$=0,8 . $\frac{H_f}{H_b}$=1,0 et $\frac{L_f}{L_b}$=0,8

FIGURE 9 Angle maximal entre le déflecteur et la direction du courant et angle optimal correspondant entre les safrans et l'estacade, pour différentes conditions paramétriques

Le moment qui s'exerce sur le déflecteur est déterminé par l'équation 8. La substitution de θ_{max} dans l'équation donne le moment qui s'exerce sur le déflecteur en position d'équilibre $M_{b\ max_*}$ et la substitution de θ dans cette équation donne le moment qui s'exerce sur le déflecteur qui se trouve en position M_{b_*}. À partir de M_{b_*} et de $M_{b\ max_*}$, il est possible de déterminer le changement intervenu dans la valeur du moment.

$$\Delta M_{b_*} = M_{b_*} - M_{b\ max_*} = A\ (\sin^2 \theta - \mathrm{Sin}^2\ \theta_{max}) \tag{19}$$

où

$$A = \frac{L_u}{L_b}\left(\frac{1}{2}\frac{L_u}{L_b} + N\right) + \frac{N^2}{2} \tag{20}$$

En posant l'équation 19, nous ne tenons compte que de la situation qui présente pour nous un intérêt pratique, c'est-à-dire celle où le déflecteur est poussé vers la gauche par le courant. Nous supposons aussi que $A_u/A_b = L_u/L_b$. Si on remplace θ par $\theta_{max} - \Delta\theta$, l'équation 19 devient:

$$\Delta M_{b_*} = \frac{A \cos 2\theta_{max}}{2}\ (1 - \cos 2\Delta\theta - \mathrm{tg}\ 2\theta_{max} \sin 2\Delta\theta) \tag{21}$$

qui détermine la réduction de la valeur du moment qui s'exerce sur l'estacade elle-même, réduction causée par la réduction de l'angle de l'estacade $\Delta\theta$.

L'équation 9 donne, sous forme normalisée, le moment qui agit sur les safrans. La substitution de θ par θ_{max} et de α par α_{max} dans l'équation donne le moment qui agit sur les safrans en position originale d'équilibre soit $M_{f\ max_*}$ et la substitution de θ par θ_{max} et de α par α_{max} dans cette équation donne le moment qui agit sur les safrans en position M_{f_*}. Ces deux moments nous permettent de déterminer la variation du moment qui agit sur les safrans $(M_{f_*} - M_{f\ max_*})$, c'est-à-dire

$$\Delta M_{f_*} = \frac{(C \cos \alpha_{max} - B) \cos (2\alpha_{max} + 2\theta_{max})}{2}\left[1 - \cos 2\Delta\theta - \mathrm{tg}\ (2\alpha_{max} + 2\theta_{max}) \sin 2\Delta\theta\right] \tag{22}$$

où

$$B = \frac{A_f}{A_b}\ N\left(\frac{L_g}{L_b} + \frac{L_f}{2L_b}\right) \tag{23}$$

et

$$C = \frac{A_f}{A_b}\ N\left(\frac{L_u}{L_b} + \frac{N+1}{2}\right) \tag{24}$$

La somme algébrique des équations 21 et 22 donne le moment qui détermine le retour du déflecteur à sa position d'équilibre:

$$\Delta M_* = \Delta M_{b_*} + \Delta M_{f_*} \qquad (25)$$

Dans la section 2.5, nous avons calculé les valeurs de α_{max} et de θ_{max} pour différents paramètres. À partir de ces valeurs et des équations 21, 22 et 25, il est possible de calculer et de tracer des courbes de ΔM_{b_*}, de ΔM_{f_*} et de ΔM_* en fonction de $\Delta\theta$, pour diverses conditions paramétriques (voir les figures 10 à 14).

Influence de L_u/L_b

La figure 10 présente la variation du moment de rééquilibrage en fonction de l'angle de déplacement du déflecteur, c'est-à-dire, les courbes de ΔM_{b_*}, de ΔM_{f_*} et de ΔM_* en fonction de $\Delta\theta$, pour différents rapports L_u/L_b. Ces courbes nous permettent de constater que la longueur de la partie protectrice (L_u) située à l'extrémité amont de l'estacade, exerce une action marquée sur les moments de rééquilibrage. Il est aussi intéressant de noter que dans les conditions paramétriques choisies, le moment total de rééquilibrage, c'est-à-dire ΔM_*, provient plus de la réduction du moment qui agit sur l'estacade dans le sens inverse à la rotation des aiguilles d'une montre (sens direct) que par une augmentation du moment qui agit sur les safrans dans le sens de la rotation des aiguilles d'une montre (sens rétrograde). Il est aussi intéressant de noter que d'une part, les courbes de ΔM_{b_*} en fonction de $\Delta\theta$ deviennent plus aplaties pour des valeurs de $\Delta\theta$ plus élevées, tandis que les courbes de ΔM_{f_*} en fonction de $\Delta\theta$ sont plus ou moins rectilignes pour tout l'éventail de $\Delta\theta$ considéré. En comparant les courbes de ΔM_* en fonction de $\Delta\theta$, on peut voir que l'effet de la variation de L_u/L_b sur ΔM_* est presque proportionnel à la valeur de L_u/L_b.

Il est important de noter que seules les courbes de ΔM_* en fonction de $\Delta\theta$ nous intéressent pour la conception du déflecteur et les résultats recherchés. Les différentes courbes de ΔM_{b_*} et ΔM_{f_*} en fonction de $\Delta\theta$ ont été choisies pour aider à visualiser le phénomène. À noter aussi que d'après les équations 21, 22 et 25, les moments de rééquilibrage ΔM_{b_*}, ΔM_{f_*} et ΔM_* calculés sont tous négatifs, ce qui indique qu'ils agissent dans le sens rétrograde. C'est uniquement pour des raisons de présentation graphique qu'on leur a attribué une valeur positive dans la figure 10.

Influence du nombre de N

La figure 11 présente les courbes du moment de rééquilibrage selon le nombre de N. Ces courbes font voir que le nombre d'éléments influe de façon marquée sur le moment ΔM_*. Plus N est élevé, plus son effet est important. Ceci signifie qu'il est mieux d'ajouter cinq éléments à un déflecteur qui en compte 15 qu'à un autre qui en compterait 10, par exemple, pour faciliter son rééquilibrage. Les courbes de ΔM_{b_*} et ΔM_{f_*} en fonction de $\Delta\theta$ de la figure 11 ne sont présentées qu'à titre indicatif. Ces courbes montrent des caractéristiques semblables à celles de la figure 10.

Influence de L_g/L_b

Nous présentons, dans la figure 12, les courbes du moment de rééquilibrage pour différents rapports L_g/L_b. L'examen de ces courbes fait immédiatement ressortir que l'effet de

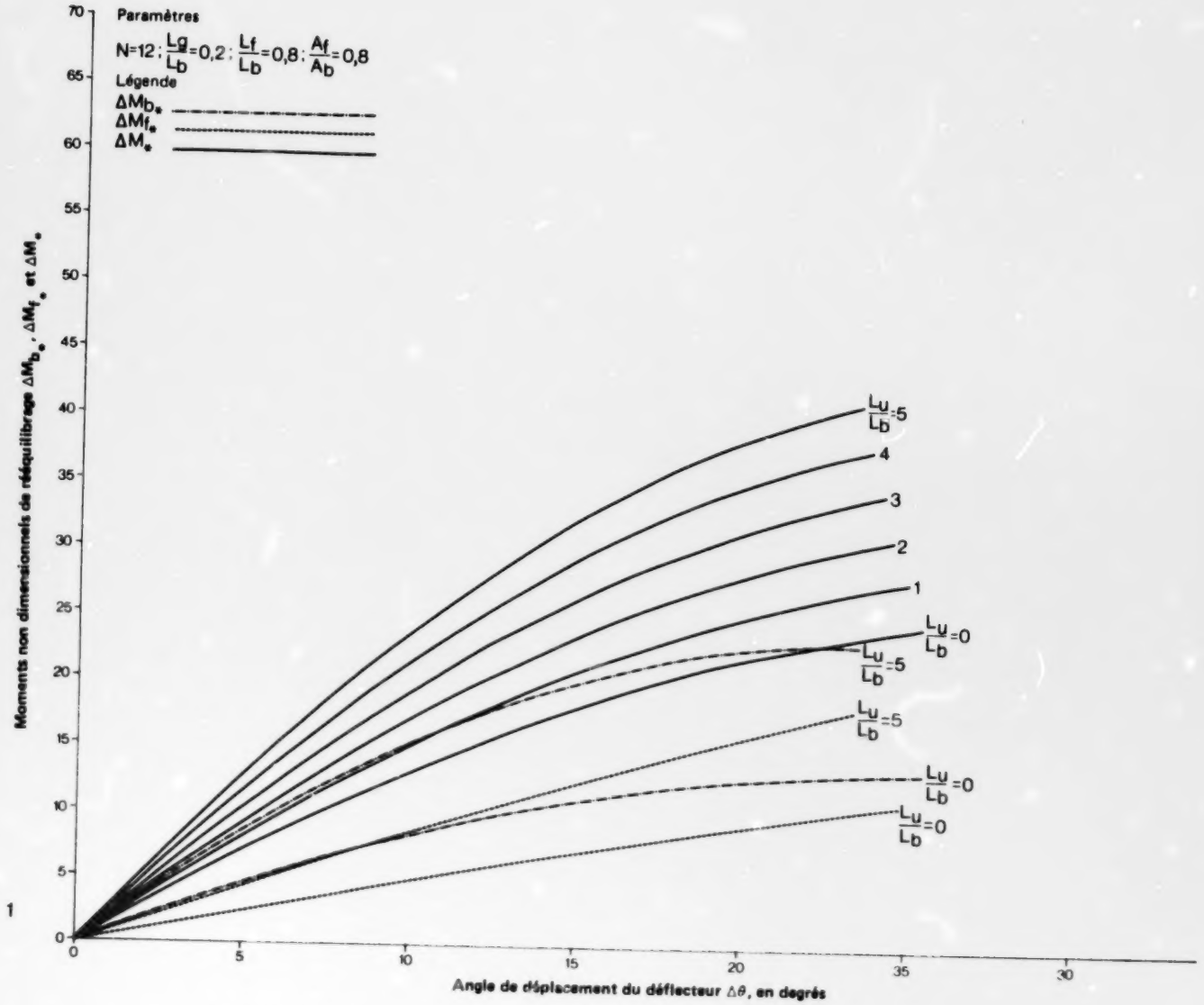


FIGURE 10 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de leur partie protectrice

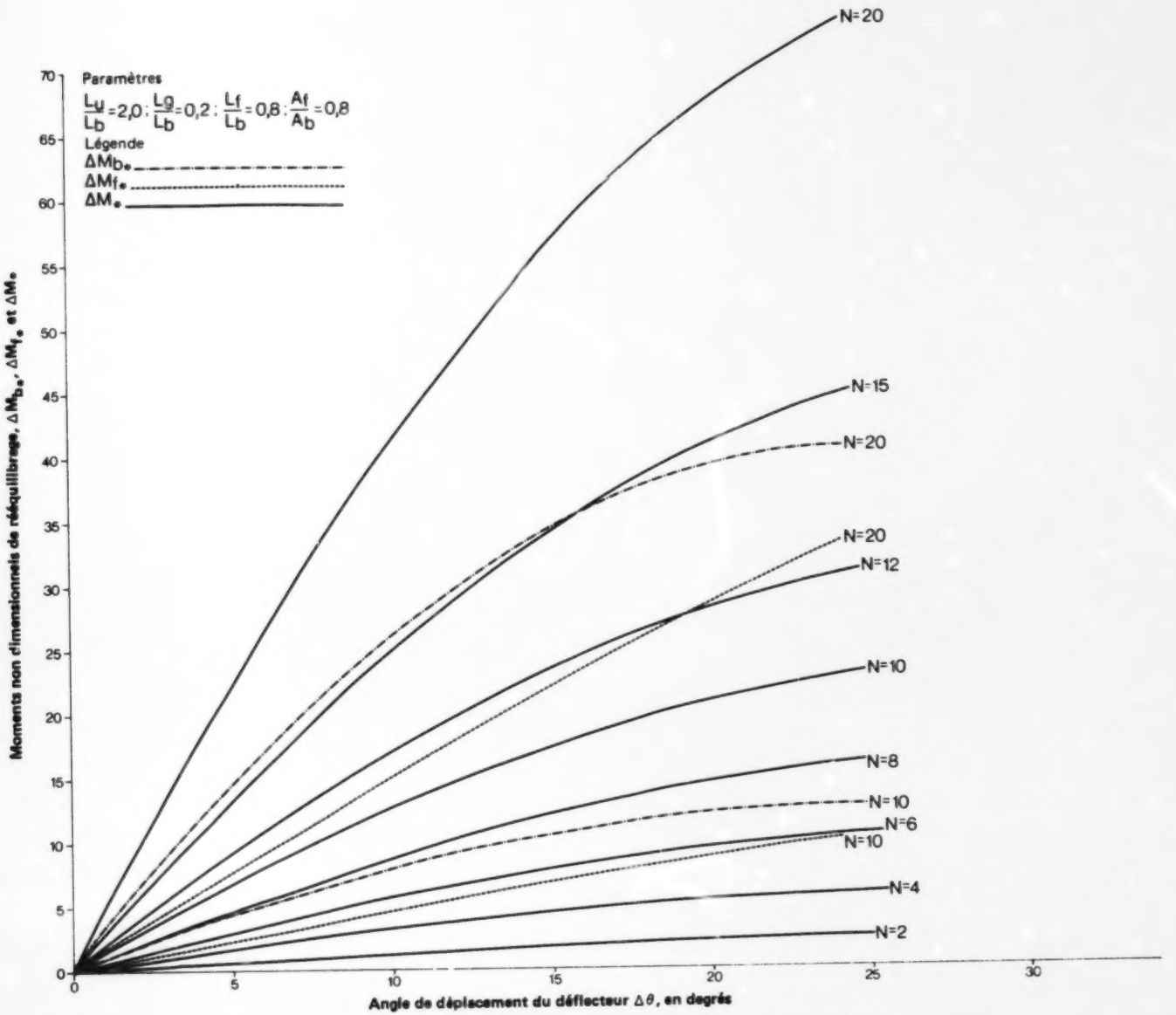


FIGURE 11 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par le nombre de leurs segments

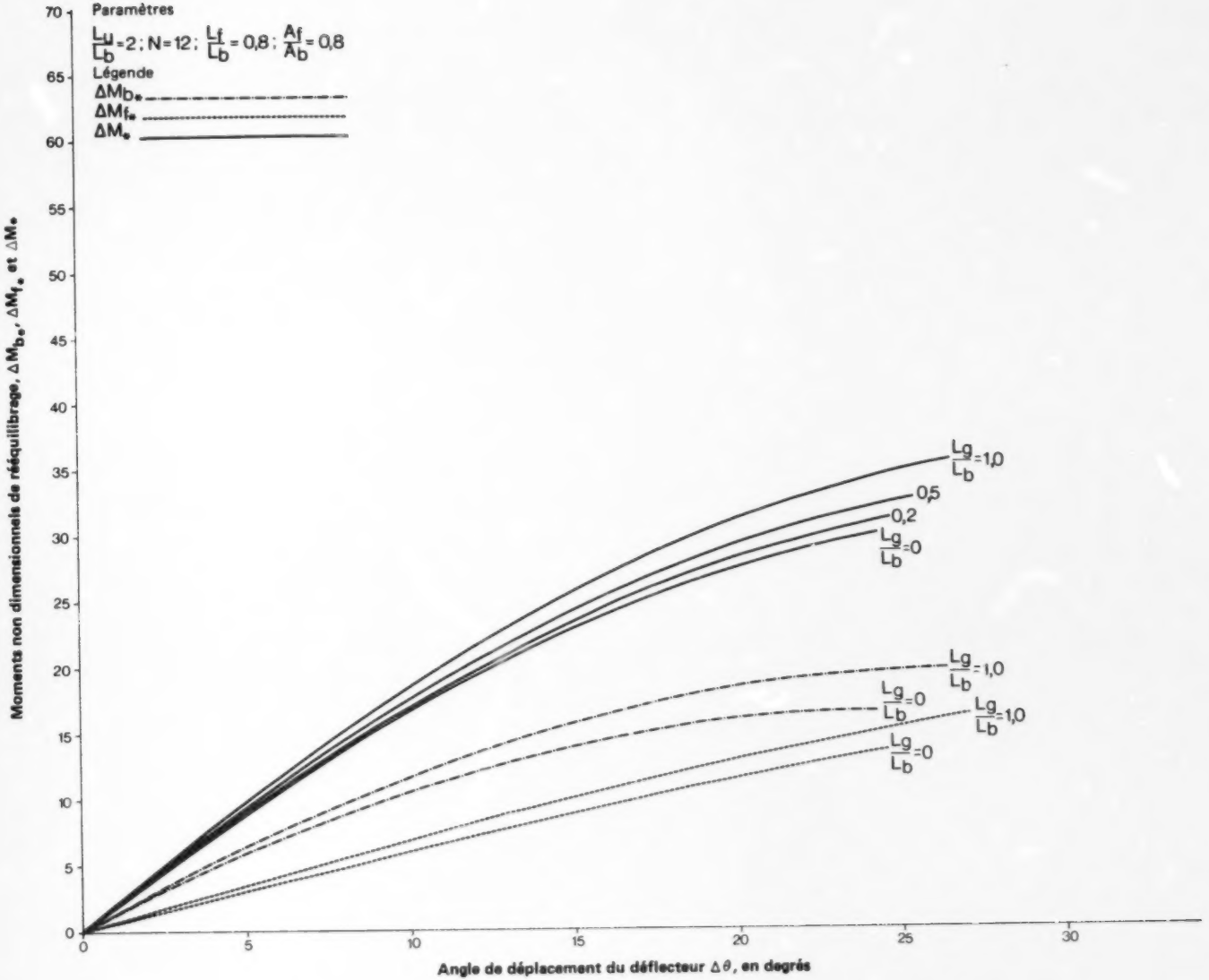


FIGURE 12 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de l'espace ménagé entre les segments et les safrans

L_g/L_b sur ΔM_*, ΔM_{b_*} et ΔM_{f_*} est limité. Par conséquent, il ne sert pas à grand chose d'augmenter l'espace ménagé entre les éléments et les safrans si l'on veut augmenter les moments qui déterminent le retour du déflecteur à sa position d'équilibre.

Influence de L_f/L_b

La figure 13 présente les courbes du moment de rééquilibrage pour différentes valeurs de L_f/L_b. On peut voir que la longueur du safran L_f influe grandement sur ΔM_*. L'augmentation de L_f constitue donc une bonne méthode d'augmenter ce moment. Les courbes supplémentaires ΔM_{b_*} et ΔM_{f_*} montrent que la longueur du safran exerce un effet plus prononcé sur ΔM_{f_*} que sur ΔM_{b_*}. Pour les déflecteurs dont le rapport L_f/L_b est faible, le moment ΔM_* dépend largement de ΔM_{b_*}, alors que pour ceux dont le rapport L_f/L_b est élevé, c'est ΔM_{f_*} qui joue le rôle le plus important.

Influence de A_f/A_b

La figure 14 présente les courbes du moment de rééquilibrage pour différents rapports A_f/A_b. Pour cette série de courbes, on fait varier la surface immergée des safrans tout en maintenant leur longueur constante; autrement dit, on augmente la surface immergée en augmentant la profondeur d'immersion. On peut voir que le rapport de la surface immergée A_f/A_b (ou le rapport de la profondeur d'immersion) influe lui aussi de façon marquée sur le moment de rééquilibrage. Toutefois, si on superpose les figures 14 et 13, on se rend compte qu'il est légèrement plus avantageux, pour augmenter ΔM_*, d'augmenter L_f plutôt que d'augmenter H_f pour une superficie donnée. Les courbes supplémentaires ΔM_{b_*} et ΔM_{f_*} nous montrent encore une fois que le rapport A_f/A_b influe de façon plus marquée sur ΔM_{f_*} que sur ΔM_{b_*}.

Une déviation efficace des glaces exige qu'un déflecteur produise un important moment de rééquilibrage lorsqu'il est déplacé. Les discussions ci-dessus nous amènent à conclure que la meilleure façon d'y parvenir est d'utiliser le plus grand nombre possible d'éléments et d'équiper chaque élément d'un safran aussi long que possible, compte tenu de certaines exigences techniques et pratiques.

2.7 Déviation des plaques de glace par le déflecteur

La figure 15 illustre la déviation d'une plaque de glace. Avant la collision, l'angle du déflecteur est θ_{max}. Au moment où la plaque de glace heurte l'estacade, le déflecteur cède sous la poussée de la glace et un moment de rééquilibrage est créé. La poussée de la glace s'exerce jusqu'à ce que l'énergie cinétique normale de la plaque de glace soit épuisée et que le déflecteur atteigne l'angle θ_{min}. Une fois cet angle atteint, le déflecteur reprend sa position première sous l'action du moment de rééquilibrage et repousse la plaque de glace plus loin si elle est toujours appuyée contre l'estacade.

Passons maintenant à la relation qui existe entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de l'estacade (θ_{max} en fonction de θ_{min}). Pour simplifier le modèle mathématique, supposons:

1. qu'après la collision, la plaque de glace ne tournera pas sur elle-même et qu'aucune énergie cinétique linéaire ne sera transformée en énergie cinétique de rotation;
2. que la friction entre la plaque de glace et l'estacade est négligeable;

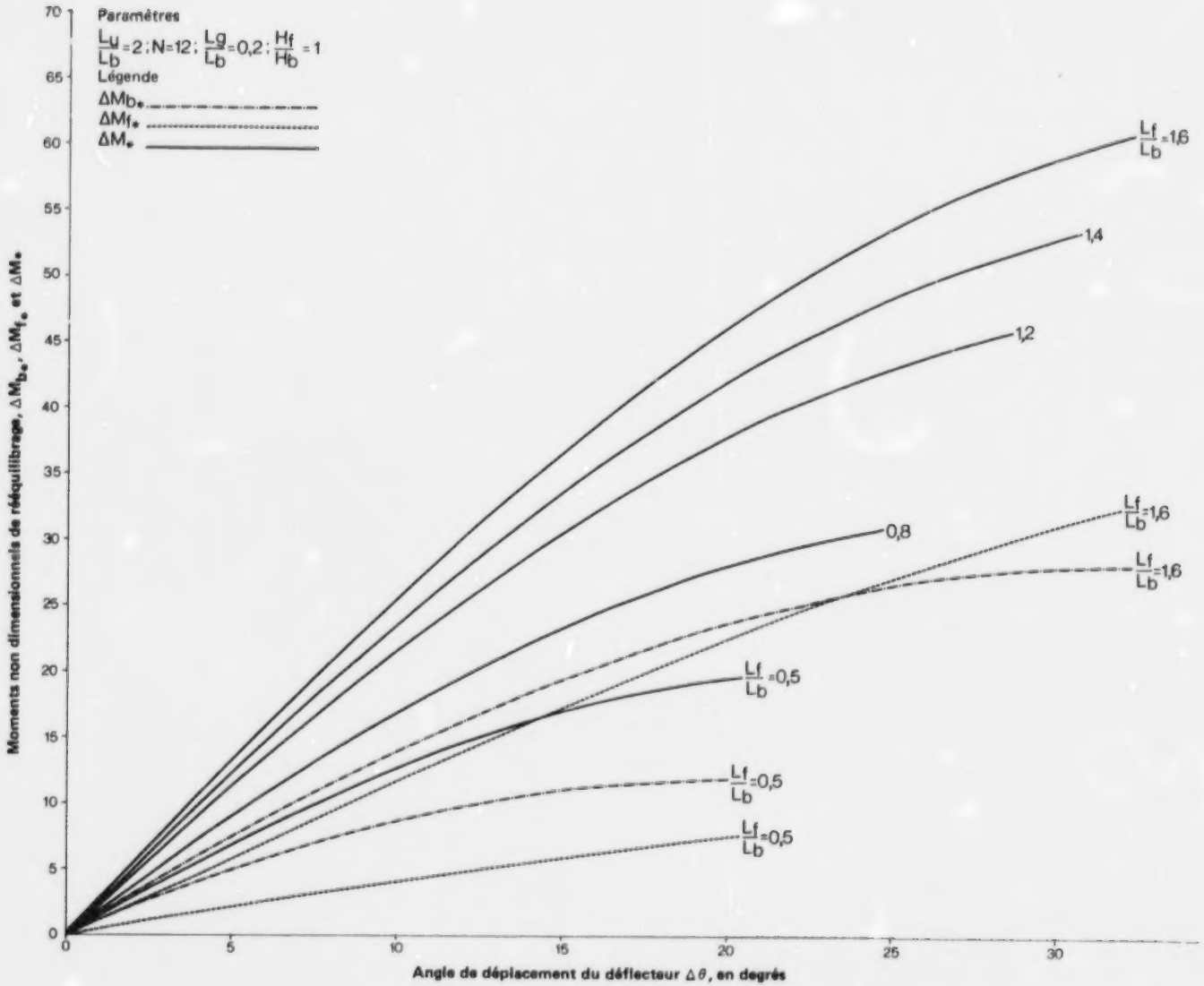


FIGURE 13 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la longueur des safrans

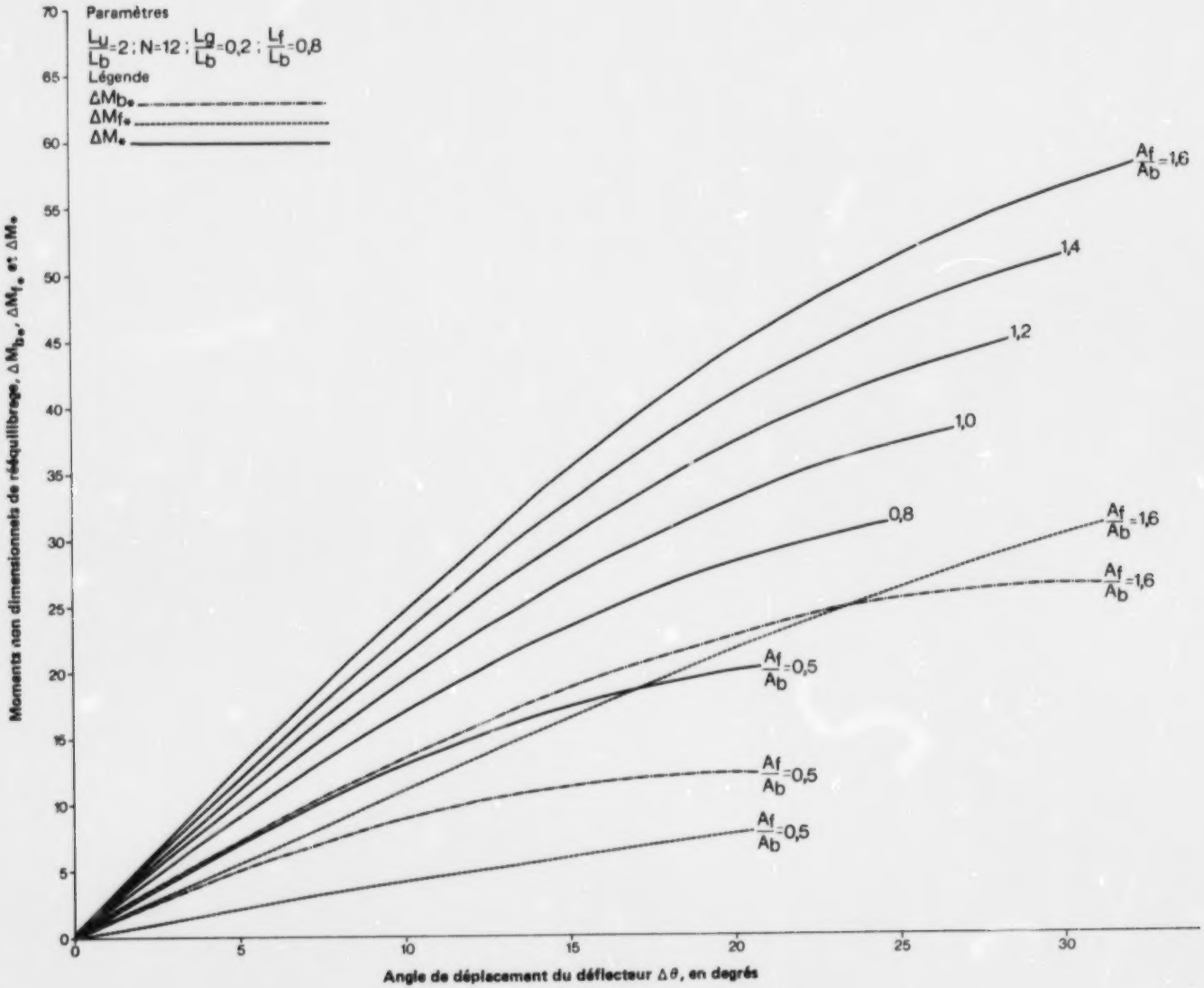


FIGURE 14 Relation entre le moment de rééquilibrage et l'angle de déviation de déflecteurs qui diffèrent par la surface immergée des safrans

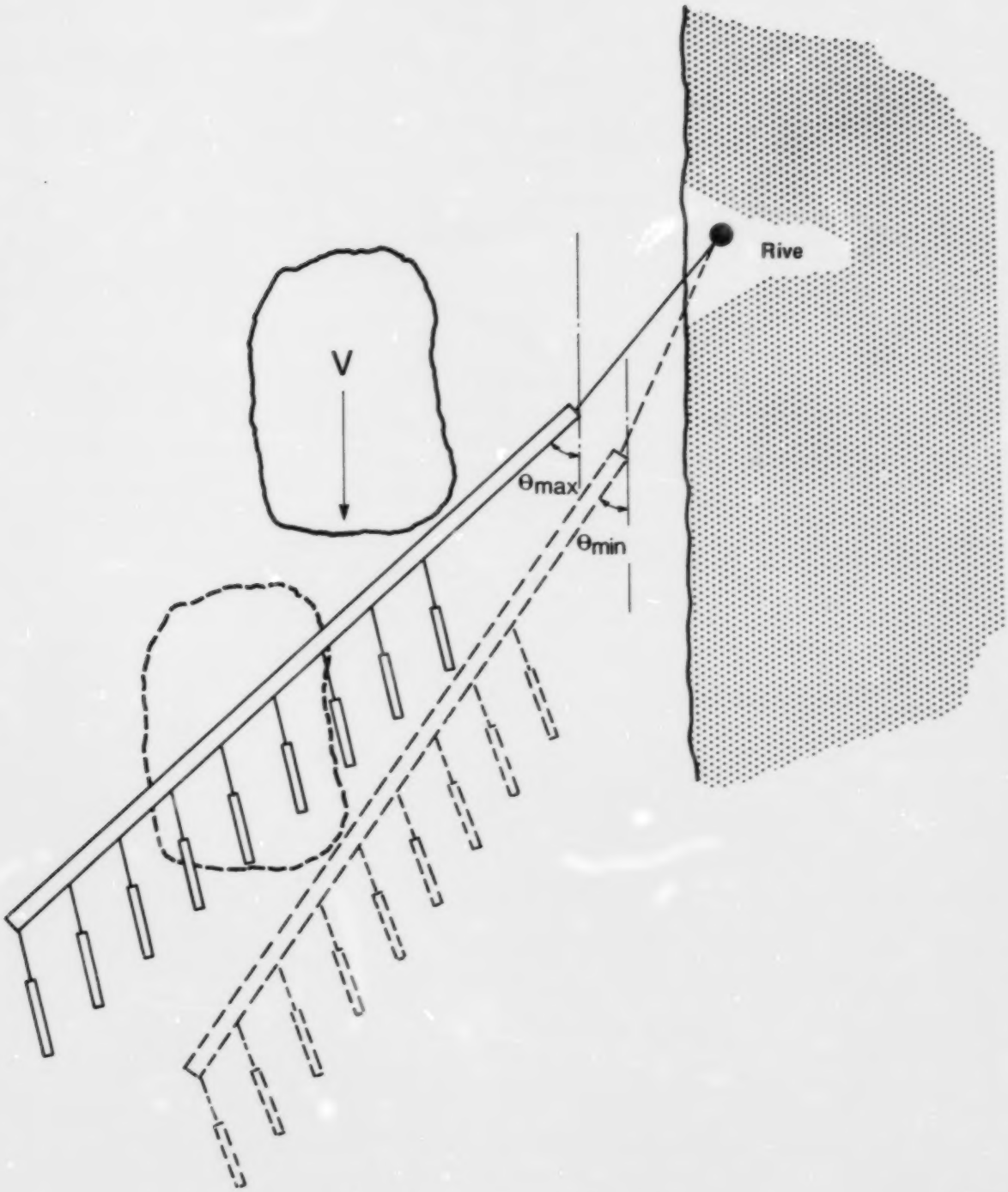


FIGURE 15 Déviation d'une plaque de glace par le prototype

3. que la perte d'énergie cinétique due à l'impact initial de la plaque de glace sur l'estacade est négligeable; et
4. que le déflecteur ne se déplace pas beaucoup si ce n'est qu'en tournant autour de son point d'amarrage.

À θ_{min}, le vecteur normal de la vitesse de la plaque de glace par rapport au déflecteur est de zéro. La perte d'énergie cinétique de la plaque de glace dans la direction perpendiculaire au déflecteur est par conséquent:

$$\Delta E_K = \frac{1}{2} (\rho_i A_i t_i) \eta V^2 \sin^2 \theta_{min} \qquad (26)$$

où ρ_i = la densité de la plaque de glace,
A_i = sa surface,
t_i = son épaisseur,
η = le coefficient de la masse virtuelle.

Selon la théorie de l'hydrodynamique (Lamb, 1932), l'immobilisation d'un objet qui se déplace dans l'air diffère de l'immobilisation d'un objet qui se déplacerait dans l'eau car, dans ce dernier cas, l'eau qui se déplace avec l'objet doit elle aussi être immobilisée. Cette situation aboutit à une augmentation équivalente de la masse de l'objet par un facteur de multiplication η plus grand que 1. Par exemple, pour un cylindre fait d'une matière de densité égale à celle de l'eau, la valeur de η s'élèvera à 2 si le cylindre se déplace dans l'eau.

Comme l'énergie cinétique normale agit à l'encontre du moment de rééquilibrage, il est possible d'écrire l'équation suivante:

$$\frac{1}{2} (\rho_i A_i t_i) \eta V^2 \sin^2 \theta_{min} + \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A_b L_b \int_{\theta_{max}}^{\theta_{min}} \Delta M_* \, d(\Delta\theta) = 0 \qquad (27)$$

Dans cette équation, le second terme sert à définir le travail effectué par le moment de rééquilibrage et l'intégrale représente la surface située sous la courbe de ΔM_* en fonction de $\Delta\theta$, entre θ_{max} et θ_{min}. En posant $\Delta\theta = \theta_{max} - \theta_{min}$, $K = \rho C_D / \rho_i \eta$ et en notant que $A_b H_b L_b$, l'équation 27 devient:

$$V_{i_*} = \frac{1}{K} \frac{A_i t_i}{L_b^2 H_b} = \frac{\int_{\Delta\theta} \Delta M_* \, d(\Delta\theta)}{\sin^2 (\theta_{max} - \Delta\theta)} \qquad (28)$$

Si V_{i_*} représente le volume sans dimension d'une plaque de glace, l'équation établit alors un rapport entre la taille de la plaque de glace et l'angle de fléchissement du déflecteur. Il est possible d'obtenir la valeur de la constante K de façon expérimentale.

En 2.6, nous avons montré que pour un ensemble donné de paramètres, il existe un angle optimal α_{max} entre les safrans et l'estacade et un angle maximal θ_{max} entre le déflecteur et la direction du courant et qu'il est possible, à partir de ces valeurs, de calculer et de tracer une courbe de ΔM_* en fonction de $\Delta\theta$. À l'aide de la valeur de θ_{max} et de la courbe de ΔM_* en fonction de $\Delta\theta$ ainsi obtenue, il est possible d'évaluer et de tracer une courbe de V_{i_*} en fonction de $\Delta\theta$ grâce à l'équation 28. C'est en suivant ce raisonnement que nous avons tracé des courbes de V_{i_*} en fonction de $\Delta\theta$ pour différentes conditions paramétriques. Ces courbes paraissent dans les figures 16 à 20.

Influence de L_u/L_b

La figure 16 présente ces courbes pour différentes valeurs de L_u/L_b, et on voit qu'un déflecteur muni d'une partie protectrice L_u assez longue résistera mieux au choc avec une plaque de glace d'une taille donnée qu'un déflecteur dont L_u est court. Mais étant donné qu'un déflecteur muni d'une courte partie protectrice permet d'obtenir un angle θ_{max} plus grand (voir figure 3), l'angle θ final après le retour du déflecteur à sa position initiale sera semblable quelle que soit la longueur de L_u. Ceci nous amène à conclure que si la partie protectrice est utile pour protéger les safrans des glaces, sa longueur n'a par contre que peu d'effet sur le pivotement du déflecteur et la taille des plaques de glace qu'il peut faire dévier.

Influence du nombre de N

La figure 17 présente les courbes pour différents nombres de N. Nous voyons que le nombre d'éléments influe indéniablement sur la taille des plaques de glace qui peuvent être déviées pour un angle de fléchissement donné. Pour apprécier vraiment l'effet de N sur V_{i_*}, il est important de noter que cette dernière valeur est présentée à l'échelle logarithmique.

Influence de L_g/L_b

La figure 18 présente les courbes pour différentes valeurs de L_g/L_b. Le regroupement de ces courbes indique que pour un angle de fléchissement donné, l'espace ménagé entre les safrans et l'estacade n'a que peu d'effet sur la taille des plaques de glace pouvant être déviées. En fait, on remarque que plus la valeur du rapport L_g/L_b est élevée, plus la courbe correspondante est basse, ce qui signifie qu'un déflecteur avec un grand espace ménagé entre les segments et les safrans se rabat davantage sous l'impact d'une plaque de glace d'une taille donnée. Comme l'augmentation de l'espace ménagé entre les segments et les safrans augmente légèrement l'angle θ_{max} (voir figure 5), l'angle θ final, après l'impact, devrait par conséquent être le même, pour une plaque de glace d'une taille donnée, peu importe la valeur de L_g. Ainsi donc, l'espace ménagé entre les segments et les safrans ne constitue pas un critère de conception critique.

Influence de A_f/A_b

La figure 19 présente les courbes V_{i_*} en fonction de $\Delta\theta$ pour différents rapports A_f/A_b. Nous voyons que la superficie du safran influe de façon marquée sur la forme des courbes. Cela ne touche pas tellement l'angle de fléchissement du déflecteur sous le choc d'une plaque de glace de taille donnée (en fait, l'angle de fléchissement augmente même lorsque la superficie des safrans est plus grande), mais surtout l'angle maximal entre le déflecteur et la direction du courant, angle dont dépend la superficie de la zone de récupération des hydrocarbures.

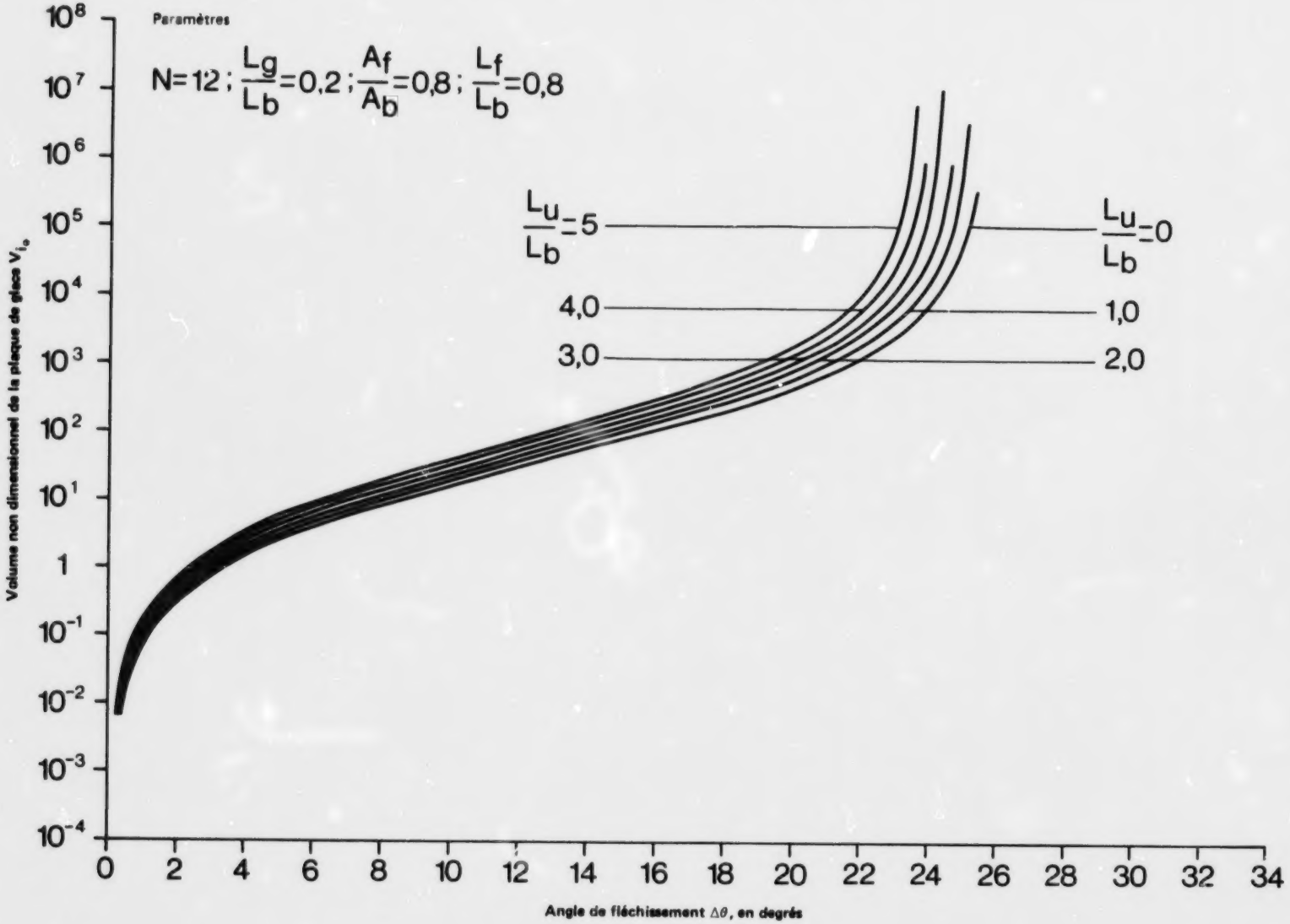


FIGURE 16 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de leur partie protectrice d'amont

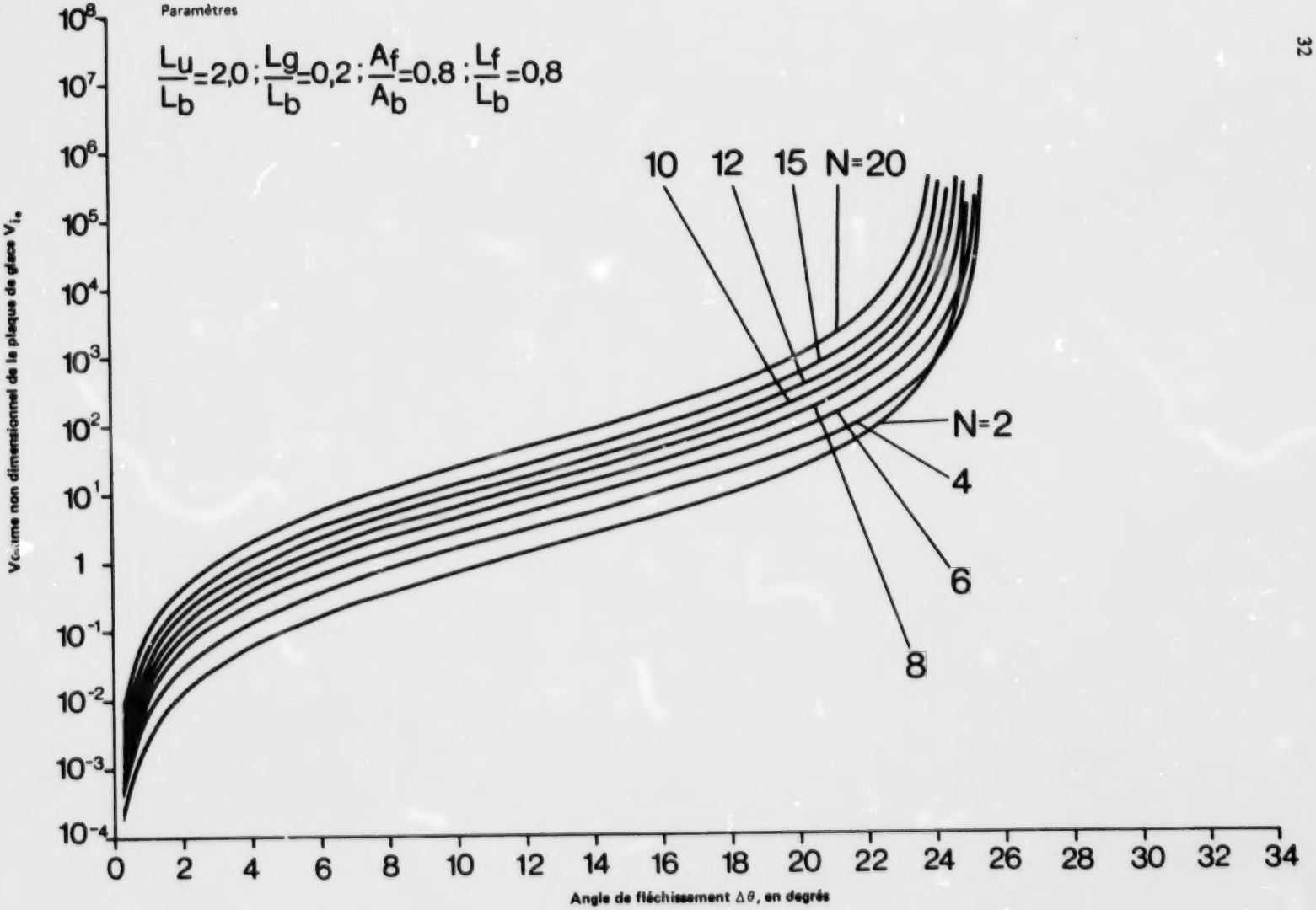


FIGURE 17 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par le nombre de segments

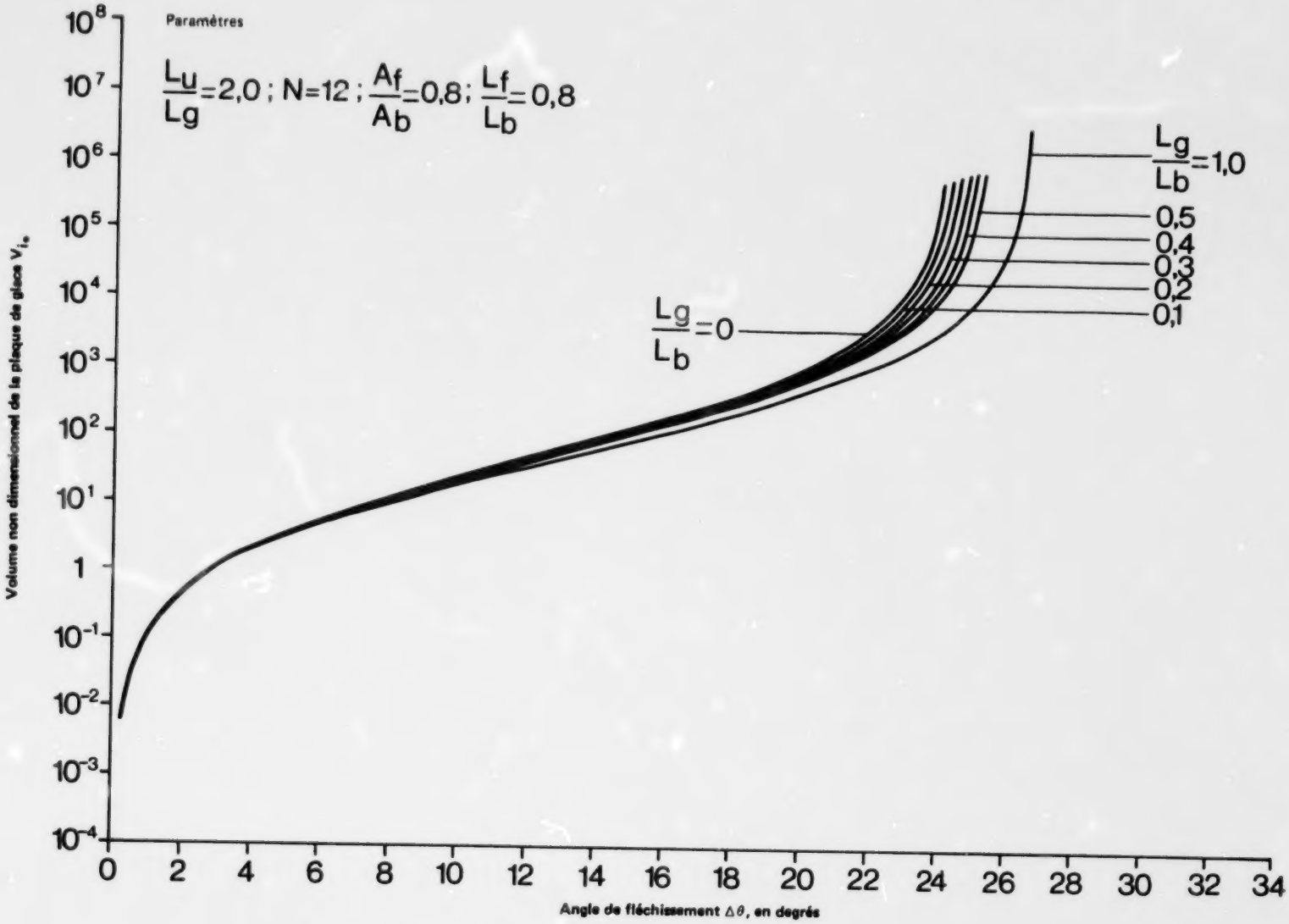


FIGURE 18 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la longueur de l'espace ménagé entre les segments et les safrans

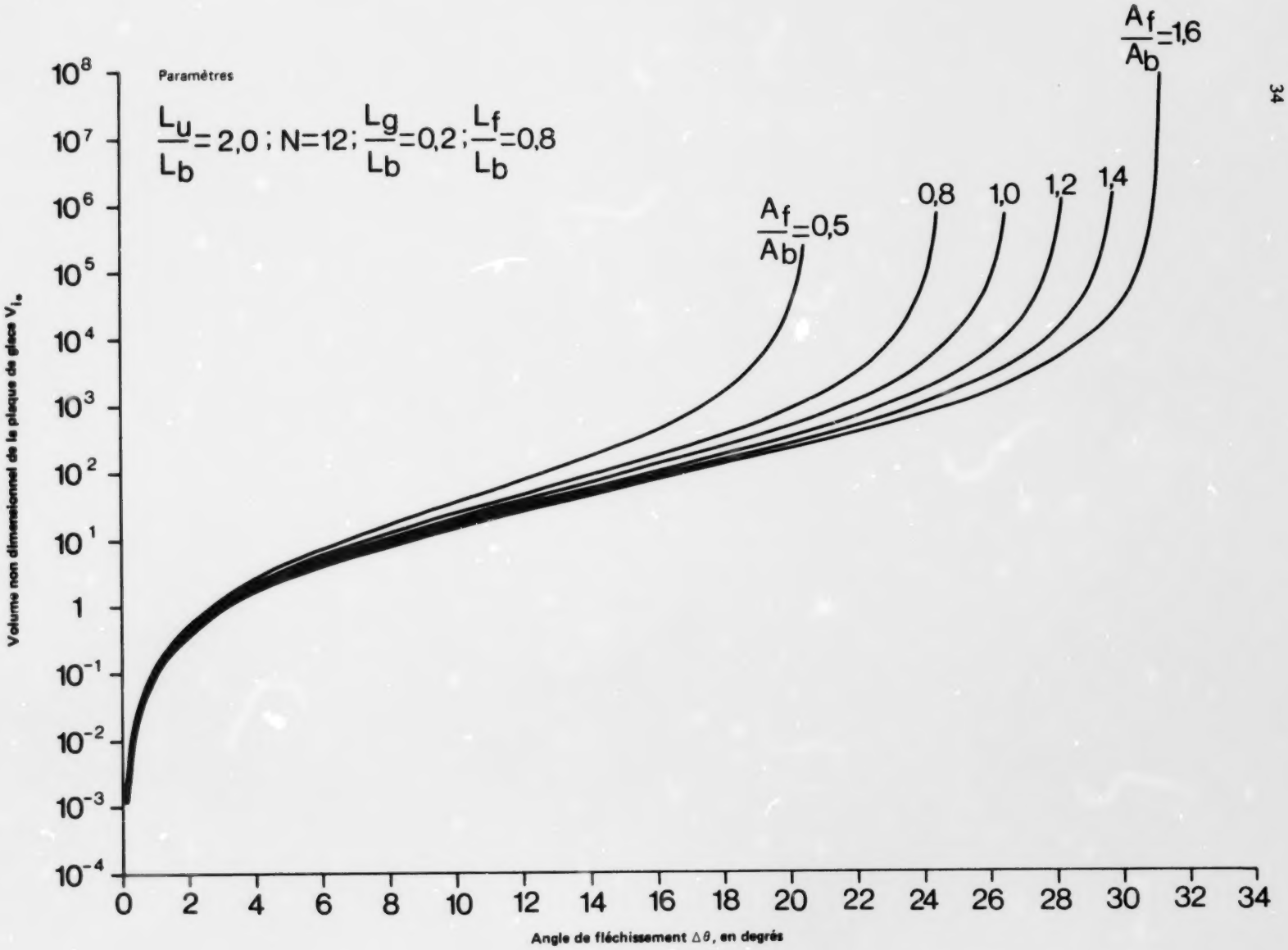


FIGURE 19 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la surface immergée des safrans

Influence de L_f/L_b

La figure 20 présente les courbes pour différentes valeurs de L_f/L_b. Ces courbes ont une forme semblable à celles de la figure 19. Cette ressemblance est en fait prévisible car pour les courbes de la figure 20, $H_f/H_b = 1$, ce qui fait que L_f/L_b est en réalité une mesure de A_f/A_b. Toutefois, lorsqu'on superpose les figures 19 et 20, on voit que les courbes de la figure 19 où le rapport A_f/A_b est inférieur à l'unité se trouvent à droite des courbes correspondantes de la figure 20 et que les courbes où le rapport A_f/A_b est supérieur à l'unité se trouvent à leur gauche. Ceci signifie que pour des safrans d'une superficie donnée, il est préférable d'augmenter la profondeur d'immersion du safran quand $A_f/A_b < 1$ et d'augmenter la longueur du safran quand $A_f/A_b > 1$.

Il est important de souligner que ces conclusions sont également valables lorsque plusieurs plaques de glace arrivent presque simultanément contre le déflecteur, à la condition que celui-ci n'ait pas atteint l'angle minimal θ_{min} lorsque la dernière plaque l'atteint. Dans ce cas, V_{i_*} devrait être considéré comme le volume combiné non dimensionnel de l'ensemble des plaques de glace.

2.8 Force de traînée qui s'exerce sur le déflecteur

Le courant exerce une force de traînée sur le déflecteur. Il est important de connaître à la fois la grandeur et la direction de cette force pour la conception des points d'amarrage et le choix des amarres.

La force de traînée s'exerce à la fois sur l'estacade et sur les safrans. Conformément à notre convention, nous ne tiendrons compte que du vecteur normal de ces forces.

La force de traînée normale, ou la force de traînée produite par le vecteur normal de la vitesse sur l'estacade peut être calculée par l'équation suivante (voir figure 2):

$$D_b = \frac{N}{2} C_D \rho V^2 \sin^2 \theta H_b L_b + \frac{1}{2} C_D \rho V^2 \sin^2 \theta H_b L_u \qquad (29)$$

où le premier terme représente la force de traînée normale sur la partie estacade de N segments munis de safrans; et le second, celle qui s'exerce sur la partie protectrice en amont. À l'aide de la normalisation suivante de la force de traînée:

$$D_{b_*} = \frac{D_b}{\left[\frac{1}{2} C_D \rho V^2 H_b L_b\right]} \qquad (30)$$

l'équation 29 peut être reformulée de la façon suivante:

$$D_{b_*} = \sin^2 \theta \left(N + \frac{L_u}{L_b}\right) \qquad (31)$$

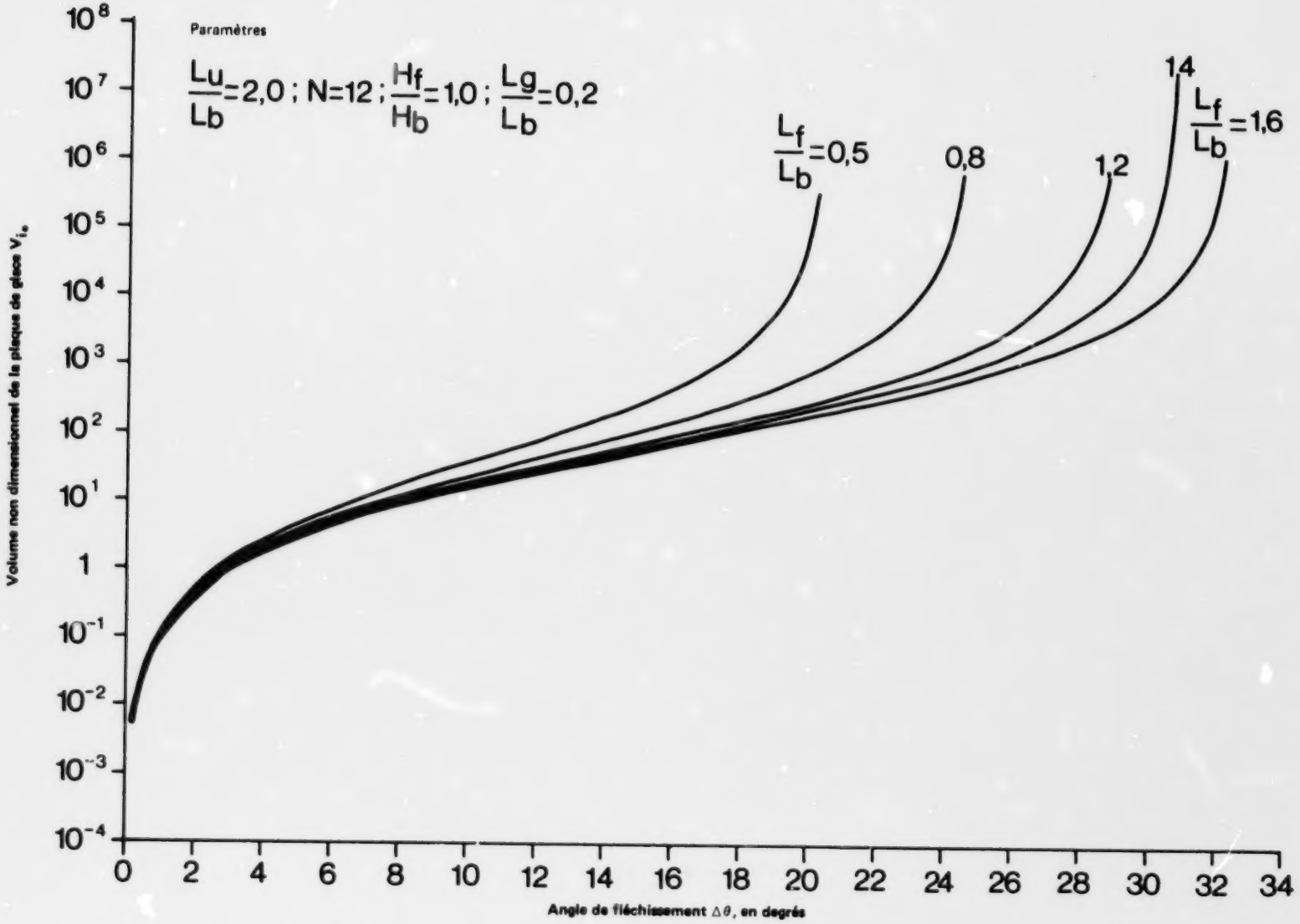


FIGURE 20 Relation entre la taille d'une plaque de glace et l'angle de fléchissement de déflecteurs qui diffèrent par la longueur des safrans

La force de traînée normale totale sur les N safrans peut s'exprimer de la façon suivante (voir figure 2):

$$D_f = \frac{N}{2} C_D \rho V^2 \sin^2 (\alpha + \theta) H_f L_f \qquad (32)$$

En normalisant D_f de la même manière que D_b, on obtient l'expression suivante:

$$D_{f_*} = \frac{N H_f L_f}{H_b L_b} \sin^2 (\alpha + \theta) \qquad (33)$$

Pour le système de coordonnées qui paraît à la figure 2, il est possible de démontrer que les composantes de D_{b_*} et de D_{f_*} en abscisse sont respectivement:

$$-D_{b_*} \cos \theta \quad \text{et} \quad -D_{f_*} \cos (\alpha + \theta)$$

et que les composantes en ordonnée sont respectivement:

$$D_{b_*} \sin \theta \quad \text{et} \quad D_{f_*} \sin (\alpha + \theta)$$

Étant donné ces composantes de la force de traînée, la force de traînée totale sur le déflecteur est donnée par l'expression suivante:

$$D_* = \left\{ \left[D_{b_*} \cos \theta + D_{f_*} \cos (\alpha + \theta) \right]^2 + \left[D_{b_*} \sin \theta + D_{f_*} \sin (\alpha + \theta) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (34)$$

et l'angle entre la direction dans laquelle s'exerce cette force de traînée et la direction du courant est donné par l'expression suivante:

$$\phi = \text{tg}^{-1} \left[\frac{-D_{b_*} \cos \theta - D_{f_*} \cos (\alpha + \theta)}{D_{b_*} \sin \theta + D_{f_*} \sin (\alpha + \theta)} \right] \qquad (35)$$

Pour des raisons pratiques, nous ne discuterons que du cas d'un déflecteur poussé vers la gauche par le courant. L'examen des équations 31, 33, 34 et 35 nous fait voir que D_* et ϕ dépendent de N, L_u/L_b, H_f/H_b, L_f/L_b, θ et α. Tel que démontré en 2.5, θ dépendant des cinq autres variables énumérées ci-dessus et de L_g/L_b, il est donc possible de tracer les courbes de D_* et de ϕ en fonction de différentes conditions paramétriques. Comme nous avons déjà démontré que L_g/L_b n'a que peu d'effet sur les courbes de θ en fonction de α, on peut utiliser une valeur typique du rapport L_g/L_b où b = 0,2, par exemple, pour calculer D_* et θ sans modifier le caractère général de l'analyse. Il ressort de l'équation 33 que l'effet de H_f/H_b et de L_f/L_b sur D_{f_*} et, par conséquent, sur D_* et ϕ, prend la forme du rapport $H_f L_f/H_b L_b$. Par conséquent, il est possible de faire varier la valeur des paramètres énumérés ci-dessus en ne faisant varier que le rapport L_f/L_b tout en maintenant le rapport H_f/H_b constant et égal, par exemple, à l'unité.

Partant de ces remarques on peut calculer et tracer les courbes de D_* et de ϕ en fonction des conditions paramétriques suivantes:

Tableau 2 Paramètres servant au calcul de la force de traînée totale

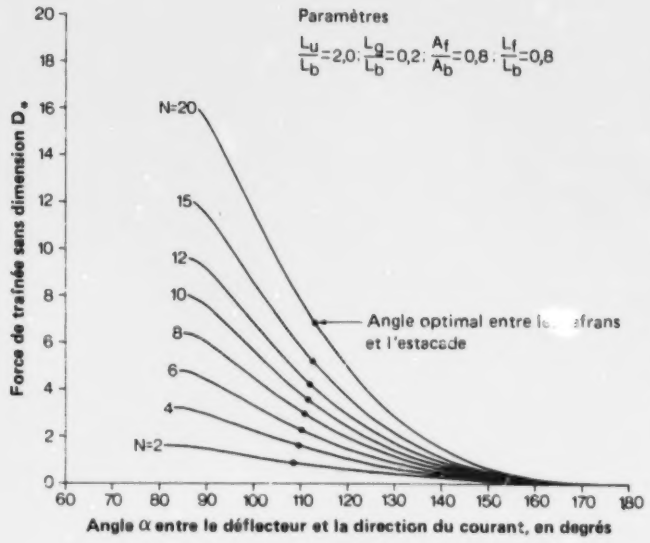
N	2	4	6	8	10	12	15	20
L_u/L_b	2							
L_f/L_b	0,5	0,8	1,2	1,4	1,6			
L_g/L_b	0,2							
H_f/H_b	1,0							

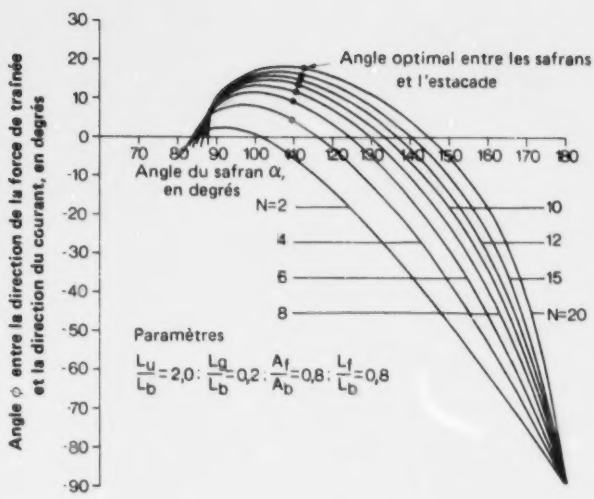
Dans le tableau 2, les valeurs soulignées sont celles qui servent à tracer la courbe de référence. Pour l'étude comparative, on utilise les valeurs soulignées pour tous les paramètres à l'exception de celui étudié qui change systématiquement de valeur, tel qu'indiqué au tableau 2. La figure 21 présente les courbes de D_* en fonction de α et les courbes de φ en fonction de α. Pour chacune des courbes, nous indiquons le point qui correspond à la valeur θ_{max} (ou α_{max}).

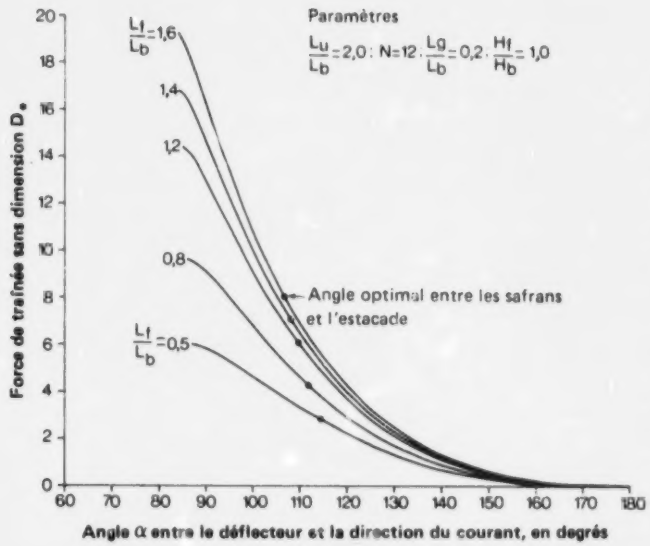
Les figures 21a et 21b présentent les résultats obtenus avec des déflecteurs qui diffèrent par le nombre de segments (N) qui les composent. La figure 21a montre que la force de traînée qui s'exerce sur le déflecteur augmente plus ou moins proportionnellement au nombre de segments. À noter qu'elle augmente progressivement à mesure qu'on referme les safrans et qu'elle n'atteint pas sa valeur maximale lorsque l'angle entre le déflecteur et la direction du courant atteint sa valeur maximale. On constate d'après ces courbes que pour éviter une force de traînée trop grande sur le déflecteur et le point d'amarrage, on devrait toujours installer le déflecteur avec les safrans déployés. Ceux-ci seront refermés graduellement pour amener peu à peu le déflecteur en position normale d'équilibre.

Selon la définition (voir figure 2), φ est l'angle entre la force de traînée et la ligne du rivage. La figure 21b fait voir que lorsque l'angle α est grand, φ prend une valeur négative, ce qui signifie que l'extrémité amont du déflecteur s'appuiera contre la berge; cet effet est à rechercher car on empêche ainsi le passage de plaques de glace dans le plan d'eau qui se trouve derrière le déflecteur. Il se peut cependant que l'on doive éloigner le déflecteur de la rive pour amorcer la fermeture des safrans. Une comparaison de la figure 21b et de la figure 4 montre que lorsqu'un déflecteur atteint sa position optimale d'équilibre, l'angle ϕ entre la direction de la force de traînée et la ligne du rivage est moindre que l'angle θ_{max}. Par conséquent l'angle entre l'amarre et la ligne du rivage sera plus petit que l'angle entre le déflecteur et la ligne du rivage, comme on peut le voir sur la figure 2.

Les figures 21c et 21d nous font voir la valeur et la direction de la force de traînée sur des déflecteurs dont la longueur des safrans diffère. L'examen de la figure 21c nous permet de constater que la force de traînée sur le déflecteur augmente à mesure qu'on augmente la longueur des safrans. À θ_{max}, l'augmentation de D_* est elle aussi plus ou moins proportionnelle à l'augmentation du rapport L_f/L_b. Quand on compare ces courbes à celles de la figure 21a on constate qu'elles sont plus rapprochées et que D_* est plus petit lorsque l'angle entre les safrans







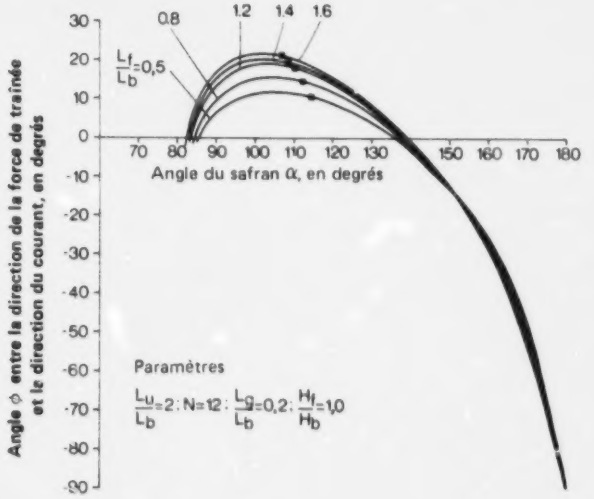


FIGURE 21 Grandeur et direction de la force de traînée qui s'exerce sur le déflecteur

et l'estacade est plus grand, ce qui signifie que l'augmentation de la longueur des safrans n'accroît pas substantiellement la force de traînée qui s'exerce sur le déflecteur lors de sa mise en place. Un déflecteur muni de longs safrans devrait donc être tout aussi facile à manipuler.

Les courbes de la figure 21d sont semblables à celles de la figure 21b, mais elles sont beaucoup plus serrées, surtout dans la partie située au-dessous de l'axe α. Ainsi, on peut voir que tout ce qui a été dit pour la figure 21b s'applique également pour la figure 21d. Le rapprochement des courbes lorsque l'angle entre les safrans et l'estacade est grand signifie que la direction de la force de traînée ne dépend pas de la longueur des safrans lorsque l'angle α est grand.

L'étude de la figure 21 nous permet de conclure que une fois qu'on connaît la vitesse du courant et les dimensions du déflecteur, il est possible de concevoir les dispositifs ou les mécanismes d'amarrage.

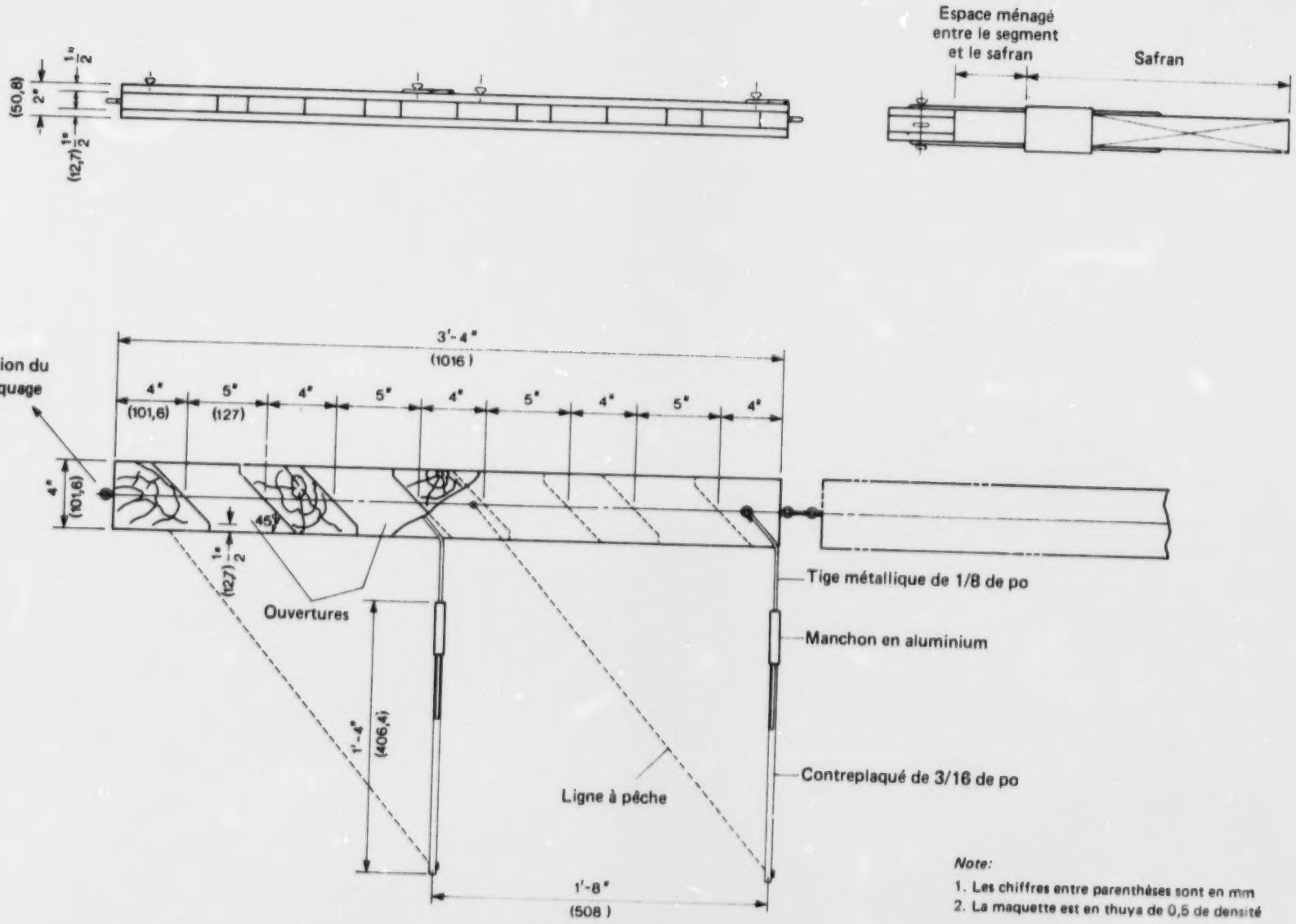
Nous aurions normalement dû vérifier en laboratoire si la tenue dynamique du déflecteur correspondait à celle suggérée par les études théoriques afin de définir les coefficients de conception nécessaires à sa construction. Toutefois, certaines contraintes de temps et d'argent nous ont obligés à nous en tenir à des études expéditives. Notre prototype a donc été conçu en fonction d'études en laboratoire sommaires et à partir de nos conclusions théoriques.

Une étude plus complète en laboratoire est envisagée et devrait se dérouler sous peu. Elle fera l'objet d'un rapport séparé et nous ne nous en tiendrons pour l'instant qu'aux essais préliminaires en laboratoire.

Aux fins de l'étude préliminaire, nous avons construit un déflecteur composé de trois éléments (voir figure 22). Il était possible de modifier l'espace ménagé entre les safrans et les segments en glissant les safrans le long de tiges qui faisaient office de charnière. Les ouvertures pratiquées dans l'estacade ont été disposées à 45° pour faciliter l'installation de cette dernière indifféremment de la rive droite ou de la rive gauche, en retournant simplement l'estacade sens dessus dessous. L'angle de chaque safran était modifié en ajustant la longueur du câble qui le rattachait à l'estacade. Les segments étaient assemblés à l'aide de crochets en métal et ils étaient remorqués dans un bassin expérimental. Des particules de plastique et des blocs de bois de 10 cm x 10 cm x 5 cm tenaient respectivement lieu d'hydrocarbures déversés et de plaques de glace. Quelques essais ont aussi été effectués avec de vraies plaques de glace mesurant jusqu'à 120 cm x 120 cm x 2,5 cm. Les essais ont été photographiés et filmés. La figure 23 est une photographie prise lors d'un essai.

Les expériences en laboratoire ont montré que lorsque le déflecteur expérimental était remorqué avec les safrans placés à 90°, le déflecteur formait un angle d'environ 40° avec la direction de remorquage. Toutefois, chaque segment prenait un angle différent. Le segment amont présentait l'angle le plus petit (35°), et le segment aval, l'angle le plus grand (environ 45°). Les trois segments formaient un arc, ce qui nuisait au mouvement des particules de plastique et des blocs de bois. Cet arc était beaucoup moins prononcé lorsque l'avant dernier safran était enlevé. Ainsi modifiée, la maquette fonctionnait très bien. Les particules de plastique passaient bien à travers les ouvertures et les blocs de bois étaient bien déviés sur le côté. Toutefois, ce déflecteur se déformait sous le choc d'une grande plaque de glace, qui parfois restait coincée entre deux éléments pendant un certain temps. Le pivotement maximal du déflecteur quand il était heurté par une plaque de glace n'était pas très grand comparativement à l'angle original entre le déflecteur et la direction de remorquage (environ 40°). Aucun essai n'a été effectué avec un déflecteur dont les segments auraient été reliés de façon rigide. Les essais ont été répétés à différentes vitesses de remorquage et il semble que celle-ci n'avait aucun effet sur la tenue du déflecteur. Pour tous les essais, le rapport L_g/L_b a été généralement maintenu à 0,25.

Ces expériences préliminaires ont confirmé que le déflecteur proposé pouvait fonctionner et il fut alors décidé de construire un prototype et de l'essayer sur le terrain.



Note:

1. Les chiffres entre parenthèses sont en mm
2. La maquette est en thuya de 0,5 de densité

FIGURE 22 Détails d'un élément du déflecteur utilisé en laboratoire

FIGURE 23 Déflecteur expérimental en action lors des essais en laboratoire

4.1 Conception et construction du prototype

À la suite des recherches théoriques et des essais préliminaires en laboratoire, nous avons conçu et construit un prototype dont le plan paraît à la figure 24. Ce prototype se composait de six segments, constitués de deux longueurs de 3,05 m (10 pi), ce qui donnait une estacade de 36,5º m (120 pi). Certaines dimensions ont dû être changées lors de la construction du prototype et les dimensions réelles figurent entre parenthèses.

Du bois dur a par erreur été utilisé alors que les plans prévoyaient du thuya. À cause de la densité du bois utilisé et des modifications apportées à certaines dimensions, les ouvertures pratiquées dans l'estacade étaient complètement immergées. Afin de pallier ce problème, des plaques de styromousse de 5 cm d'épaisseur ont été clouées sous l'estacade. Si la meilleure flottabilité ainsi obtenue permit que les ouvertures dépassent la surface de l'eau d'environ 4 cm (1 1/2 po), l'estacade penchait vers l'arrière et elle était instable. Les safrans jouèrent heureusement un rôle de balanciers.

4.2 Essais du prototype sur le terrain

Les essais ont eu lieu dans la rivière Détroit, à Amhurstburg (Ontario), en mars 1978. La figure 25 donne une idée des lieux et du dispositif expérimental. Le courant de surface le long des axes I - I et II - II a été mesuré à l'aide d'un courantomètre. Ces données paraissent au tableau 3. Comme ces mesures ont été faites d'un bateau, on peut raisonnablement s'attendre à une marge d'erreur de ± 10 p. 100. La variation du courant le long des axes paraît aussi sur la figure 25. Dans l'ensemble, on peut voir à partir du tableau 3 et de la figure 25 que la vitesse moyenne en surface à l'endroit des essais était d'environ 0,55 m/s (1,8 pi/s).

Tout le matériel avait été empilé près de la baie où le déflecteur fut assemblé. Il fallut en moyenne 15 min. environ à une équipe de quatre hommes utilisant une grue mobile pour monter un safran sur un segment et mettre l'élément à l'eau. Une autre demi-heure a été nécessaire pour relier les segments et installer le câble actionnant les safrans. On sauverait beaucoup de temps en modifiant la conception technique du déflecteur et la méthode d'installation. Une fois assemblé, le déflecteur fut remorqué de la baie dans la rivière Détroit et amarré à une bitte sur le quai.

Des essais limités ont tout d'abord été effectués avec un déflecteur à segments articulés. Il s'est rapidement avéré qu'une estacade flexible serait beaucoup trop déformée sous le choc d'une grosse plaque de glace. Nous avons par conséquent inséré des chevilles de bois entre les segments pour que l'estacade soit rigide. L'insertion des chevilles a donc été faite après la mise à l'eau. L'estacade s'est montrée très stable pendant la suite des essais, même lorsqu'elle était frappée par une grosse plaque de glace.

Pendant l'expérience, l'angle des safrans était mesuré à l'aide d'un rapporteur par un des membres de l'équipe placé sur l'estacade. Une autre personne était chargée de mesurer la vitesse du courant en surface, au point médian de chaque segment. Deux méthodes ont servi à mesurer l'angle entre le déflecteur et la direction du courant: la première consistait à mesurer

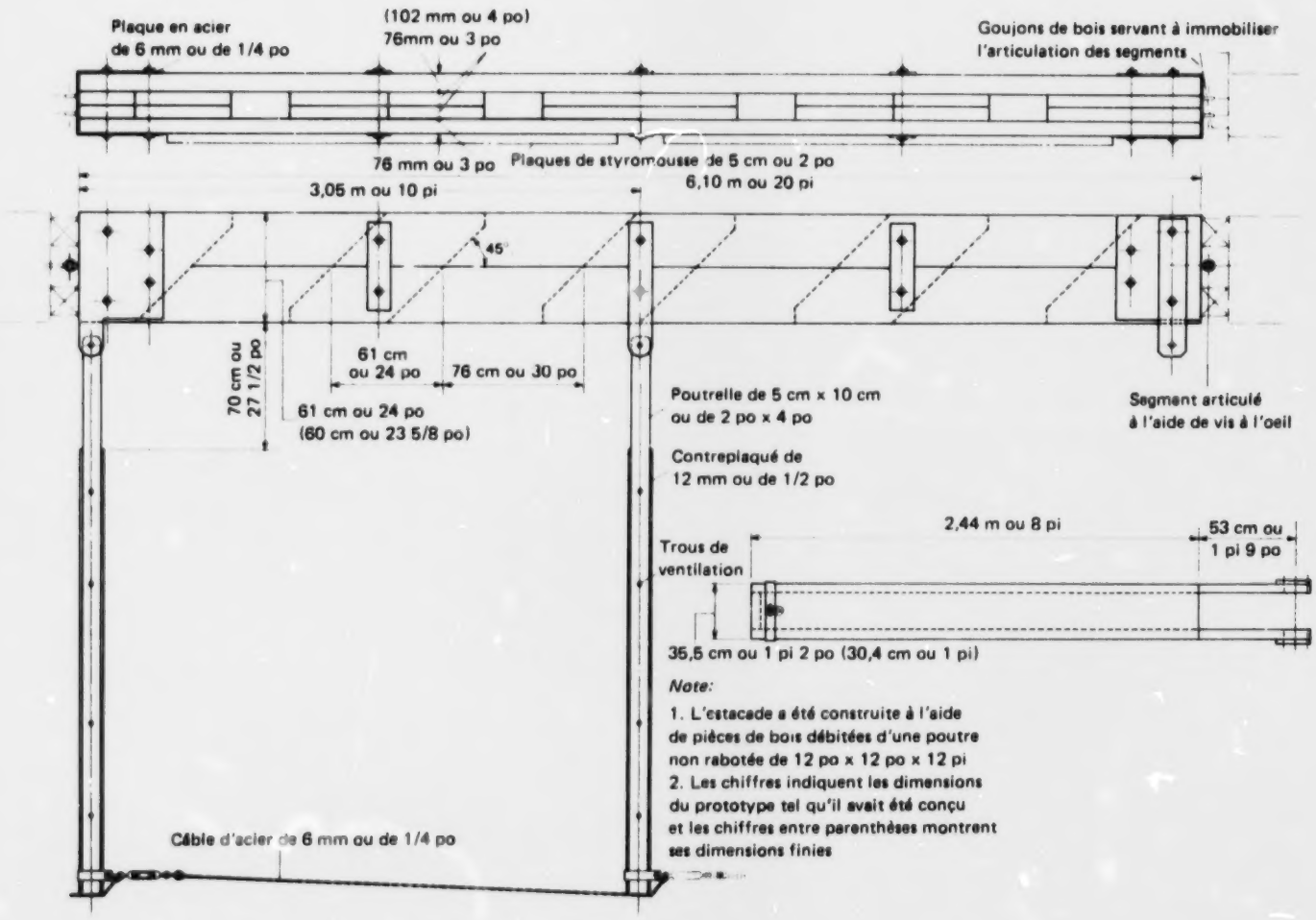


FIGURE 24 Prototype destiné aux essais sur le terrain

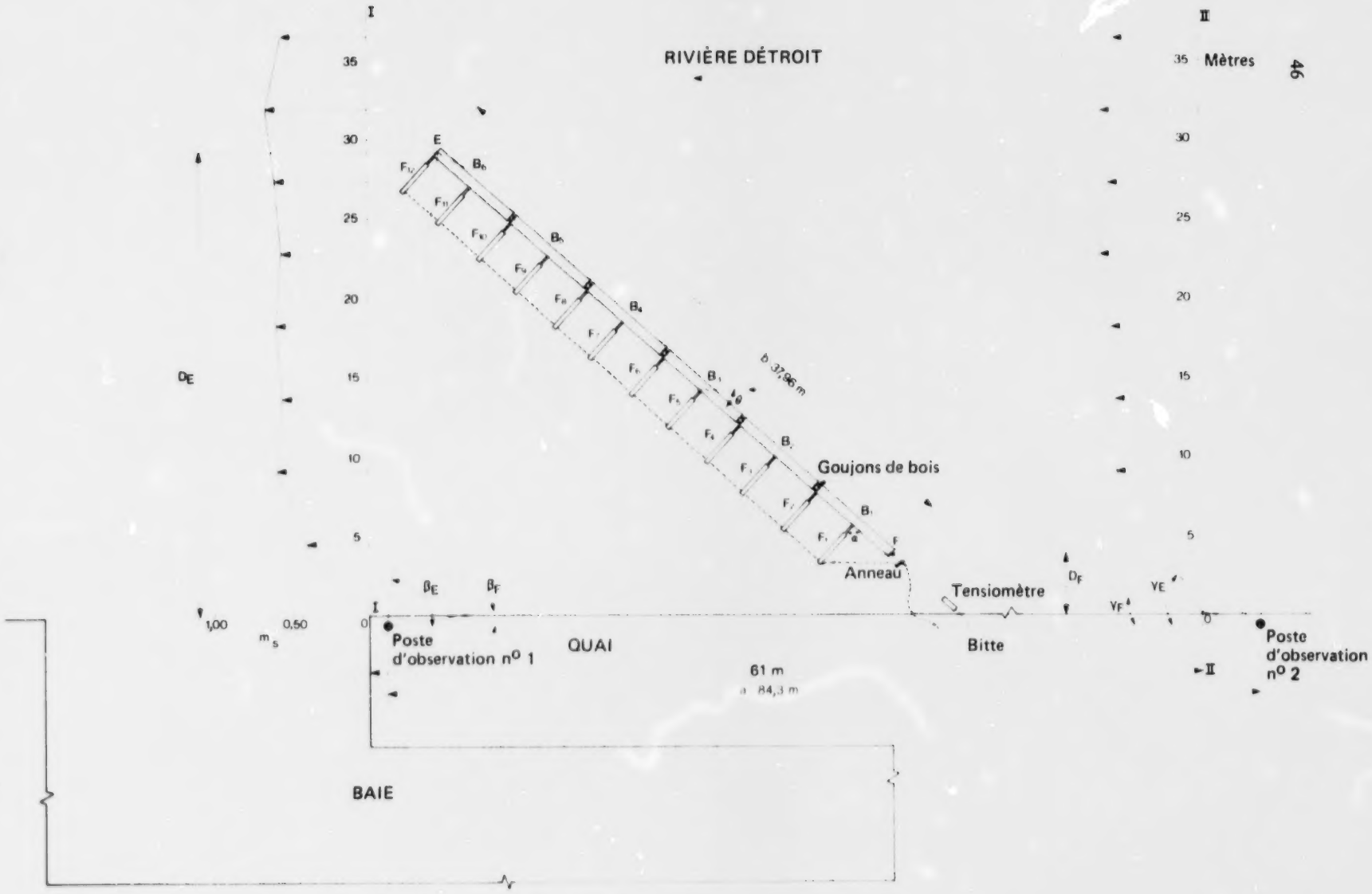


FIGURE 25 Plan de disposition du déflecteur prototype en vue des essais sur le terrain

Tableau 3 Vitesse du courant à la surface, au moment des essais sur le terrain

Distance de la rive		Vitesse le long de l'axe I - I		Vitesse le long de l'axe II - II	
m	pi	m/s	pi/s	m/s	pi/s
4,57	15,0	0,40	1,3	–	–
9,15	30,0	0,58	1,9	0,55	1,8
13,72	45,0	0,55	1,8	0,55	1,8
18,29	60,0	0,58	1,9	0,58	1,9
22,87	75,0	0,55	1,8	0,64	2,1
27,44	90,0	0,58	1,9	0,58	1,9
32,01	105,0	0,64	2,1	0,64	2,1
36,59	120,0	0,55	1,8	0,55	1,8

avec des câbles et avec la plus grande coordination possible, la distance qui séparait les extrémités amont et aval du déflecteur de la rive et à procéder ensuite par trigonométrie; la seconde méthode consistait à mesurer les angles entre la base métrique et la ligne de visée aux extrémités amont et aval, à partir des deux postes d'observation indiqués à la figure 25 et à calculer ensuite l'angle de façon analytique.

Afin de mesurer la force totale qui s'exerçait sur le déflecteur, le câble retenant l'estacade et le câble retenant les safrans ont été reliés à un tensiomètre, comme l'indique la figure 25. L'angle entre les safrans et l'estacade était modifié manuellement par deux hommes qui tiraient sur le câble reliant les safrans.

Nous n'avons pas tenté de noter exactement la taille des plaques de glace ou l'angle de fléchissement du déflecteur sous le choc des glaces. Toutefois, pendant les essais, il est arrivé que le déflecteur soit frappé par des plaques de glace mesurant jusqu'à 20 m x 20 m x 0,2 m d'épaisseur (70 pi x 70 pi x 80 po), et les angles mesurés devraient en témoigner. La photographie de la figure 26 montre le déflecteur pendant les essais et une grosse plaque de glace comme on en voit fréquemment dans cette rivière.

Afin d'étudier le passage de la nappe d'hydrocarbures à travers les ouvertures pratiquées dans l'estacade et son détournement vers la rive par les safrans, nous avons déversé des particules de plastique en amont, à partir d'un remorqueur. La figure 27 montre le passage des particules par les ouvertures de l'estacade et l'arrêt simultané d'une plaque de glace par le déflecteur. La figure 28 montre que les particules de plastique simulant les hydrocarbures sont transportées vers la rive par le courant de surface dirigé par les safrans. Nous avons pu observer que seules les particules emprisonnées entre des plaques de glace ne traversaient pas les ouvertures de l'estacade. Ces résultats sont d'autant plus remarquables que les ouvertures avaient été mal disposées dans l'estacade, à la suite d'erreurs de construction. Nous avons également constaté que le courant dévié transportait les particules de plastique vers la rive sans difficulté, sur plus de 30 m (100 pi).

FIGURE 26 Le prototype à l'essai dans la rivière Détroit

FIGURE 27 La nappe "d'hydrocarbures fictifs" traverse l'estacade alors que les plaques de glace sont déviées

FIGURE 28 Les safrans dirigent la "nappe fictive" vers la rive

4.3 Résultats des expériences et comparaison avec les prévisions théoriques

En tout, nous avons procédé à 14 essais. Les résultats de ces essais sont compilés au tableau 4.

En étudiant le tableau 4 on constate que le déflecteur n'a pas réduit de façon significative la vitesse du courant, même s'il est possible qu'il en ait changé la direction. La vitesse du courant était mesurée à l'aide d'un courantomètre non directionnel Price.

Les résultats du tableau 4 montrent encore que le fait d'avoir relié tous les safrans au même câble a donné lieu à une accumulation d'erreurs dans l'orientation des safrans. Dans l'éventail des orientations mises à l'essai, il n'était pas rare d'observer une différence de plus de 10^{o} entre les différents safrans. Ce problème donne à penser que les safrans devraient être orientés individuellement ou par petits groupes.

Les mesures de l'angle entre le déflecteur et la direction du courant effectuées à l'aide de théodolites et celles qui ont été obtenues par trigonométrie dans des conditions similaires, étaient passablement proches l'une de l'autre, comme le démontre le tableau 4. Ceci signifie que lors d'études ultérieures, on pourra utiliser l'une ou l'autre de ces deux méthodes selon les circonstances.

La figure 29 présente la courbe de l'orientation de l'estacade θ en fonction de l'orientation des safrans α, tracée à partir des résultats du tableau 4. La même figure montre la courbe théorique de θ en fonction de α pour le prototype. Les paramètres du prototype, calculés à partir des dimensions utilisées lors de sa construction, étaient $L_d/L_b = 0$, $N = 12$, $L_g/L_b = 0{,}33$, $A_f/A_b = 0{,}6$ et $L_f/L_b = 0{,}8$. Il est important de souligner qu'en vertu de notre théorie, L_g représente non pas l'espace ménagé entre les safrans et l'estacade, mais la distance qui sépare l'extrémité amont du safran d'une ligne tracée au centre de l'estacade. La figure 29 présente finalement deux courbes enveloppes qui servent à délimiter les points expérimentaux du graphique.

La figure 29 montre que compte tenu des erreurs expérimentales auxquelles on pouvait raisonnablement s'attendre, les résultats des essais sur le terrain confirment la théorie. Les points expérimentaux suivent d'assez près la courbe théorique et les courbes qui les relient ont une forme semblable à celle de la courbe théorique.

Si tout avait fonctionné sans accroc, la courbe limite supérieure aurait dû coïncider plus ou moins avec la courbe théorique. Toutefois, tel n'est pas le cas, et on observe que la courbe enveloppe est parfois de 5^{o} au-dessus de la courbe théorique. Les valeurs de θ_{max} des deux courbes diffèrent par environ $3{,}5^{o}$. Ces différences peuvent être attribuables à deux facteurs. D'une part, l'ajout de plaques de styromousse sous l'estacade a fait pencher cette dernière du côté des safrans, les enfonçant dans l'eau un peu plus. Le courant exerçait donc une force de traînée plus grande sur les safrans, ce qui contribuait à augmenter l'angle entre le déflecteur et la direction du courant. D'autre part, comme les ouvertures pratiquées dans l'estacade avaient été chanfreinées, la résistance qu'elles exerçaient sur le courant était moins grande que celle qui était exercée par les safrans. Autrement dit, le coefficient de traînée de l'estacade devrait être inférieur à celui des safrans. Un coefficient de traînée plus grand pour les safrans que pour l'estacade augmente l'angle entre le déflecteur et la direction du courant.

Si on considère la courbe limite supérieure comme étant approximativement égale à la courbe représentant la position du prototype en l'absence de glaces, on peut voir, en examinant la figure 29, que l'angle de fléchissement maximal du déflecteur pendant l'expérience

Tableau 4 Résultats des essais sur le terrain

Essai n°	Angle α entre les safrans et l'estacade, en degrés													Vitesse du courant en surface V*, m/s							Orientation de l'estacade θ, en degrés	
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	Moyenne	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	B_6	Moyenne	Avec théodolite	Méthode trigonométrique
1	78**	78**	76	76	76	78	81	81	82	85	88	90	81,3	0,46	0,58	0,58	0,46	0,43	0,46	0,49	0,5	–
2	–	–	92	93	92	92	97	96	101	93	96	96	94,8	0,36	0,37	0,52	0,58	0,64	0,55	0,50	15,4	–
3	105	106	109	111	111	112	116	117	113	112	119	120	112,5	0,40	0,43	0,55	0,46	0,46	0,58	0,48	26,5	–
4	107	107	111	111	111	111	113	110	109	109	117	114	110,0	0,43	0,67	0,58	0,58	0,46	0,58	0,54	24,3	–
5	89	91	92	93	96	96	99	99	98	98	100	100	95,9	0,27	0,46	0,43	0,52	0,58	0,52	0,46	16,0	16,1
6	92	92	96	97	99	99	102	102	102	101	102	102	98,8	0,46	0,43	0,64	0,64	0,58	0,64	0,56	17,8	17,6
7	101	101	101	99	101	101	101	101	101	100	103	102	101,0	0,46	0,52	0,58	0,67	0,64	0,64	0,59	18,0	20,1
8	96	98	101	102	102	104	105	105	104	104	104	106	102,6	0,46	0,52	0,55	0,55	0,64	0,64	0,56	18,3	19,7
9	99	101	103	103	105	105	108	107	106	106	108	107	104,8	0,40	0,46	0,55	0,58	0,64	0,58	0,53	17,8	19,8*;17,6*
10	109	109	111	111	111	111	115	115	112	112	115	115	112,2	0,52	0,43	0,58	0,58	0,58	0,67	0,56	19,1	17,7
11	116	118	120	118	118	118	120	118	118	118	118	118	118,2	0,40	0,55	0,52	0,67	0,64	0,64	0,57	25,0	26,4
12	127	127	127	127	127	127	128	128	125	124	124	125	126,3	0,46	0,58	0,52	0,46	0,55	0,58	0,52	16,1	16,9
13	134	–	132	–	132	–	134	–	128	–	127	–	131,2	0,46	0,52	0,52	0,43	0,64	0,64	0,53	21,1	19,6
14	–	148	147	146	144	141	141	140	134	133	134	133	140,0	0,52	0,52	0,46	0,43	0,58	0,58	0,52	22,4	22,7

Nota:

1. La figure 25 donne l'ordre dans lequel sont disposés les segments et les safrans.
2. La vitesse a été mesurée au point médian des segments.
3. L'orientation du déflecteur à l'aide de la méthode trigonométrique utilise la formule suivante: $\text{Sin } \theta = (D_E - D_F)/b$ (voir figure 25).
4. L'orientation du déflecteur mesurée à l'aide d'un théodolite a été obtenue à l'aide de la formule suivante (voir figure 25).

$$\text{Sin } \theta = \frac{a}{b} \left[\frac{\text{Sin } \beta_E \text{ Sin } \gamma_E}{\text{Sin } (\beta_E + \gamma_E)} - \frac{\text{Sin } \beta_F \text{ Sin } \gamma_F}{\text{Sin } (\beta_F + \gamma_F)} \right]$$

5. Pendant l'expérience, les vents étaient du sud–sud-ouest à 7 noeuds. La densité des plaques de glace à la dérive était faible.
6. Épaisseur de la glace: grosses plaques – 15 à 20 cm; petites plaques – 8 à 10 cm; à l'occasion, 30 cm.

* Dans différentes conditions de glace.

** Le safran touche la rive.

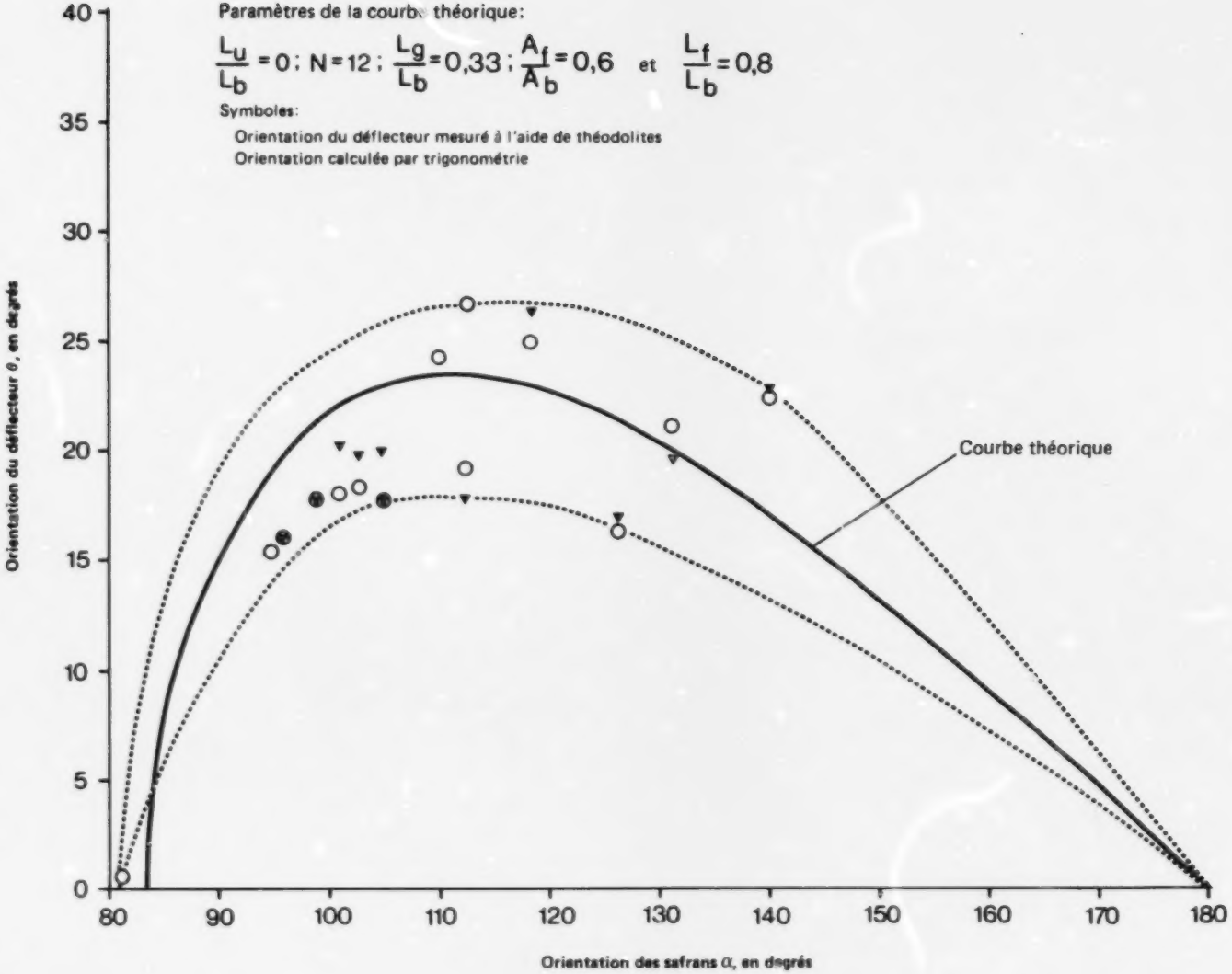


FIGURE 29 Comparaison de l'expérience et de la théorie en ce qui concerne la relation entre θ et α

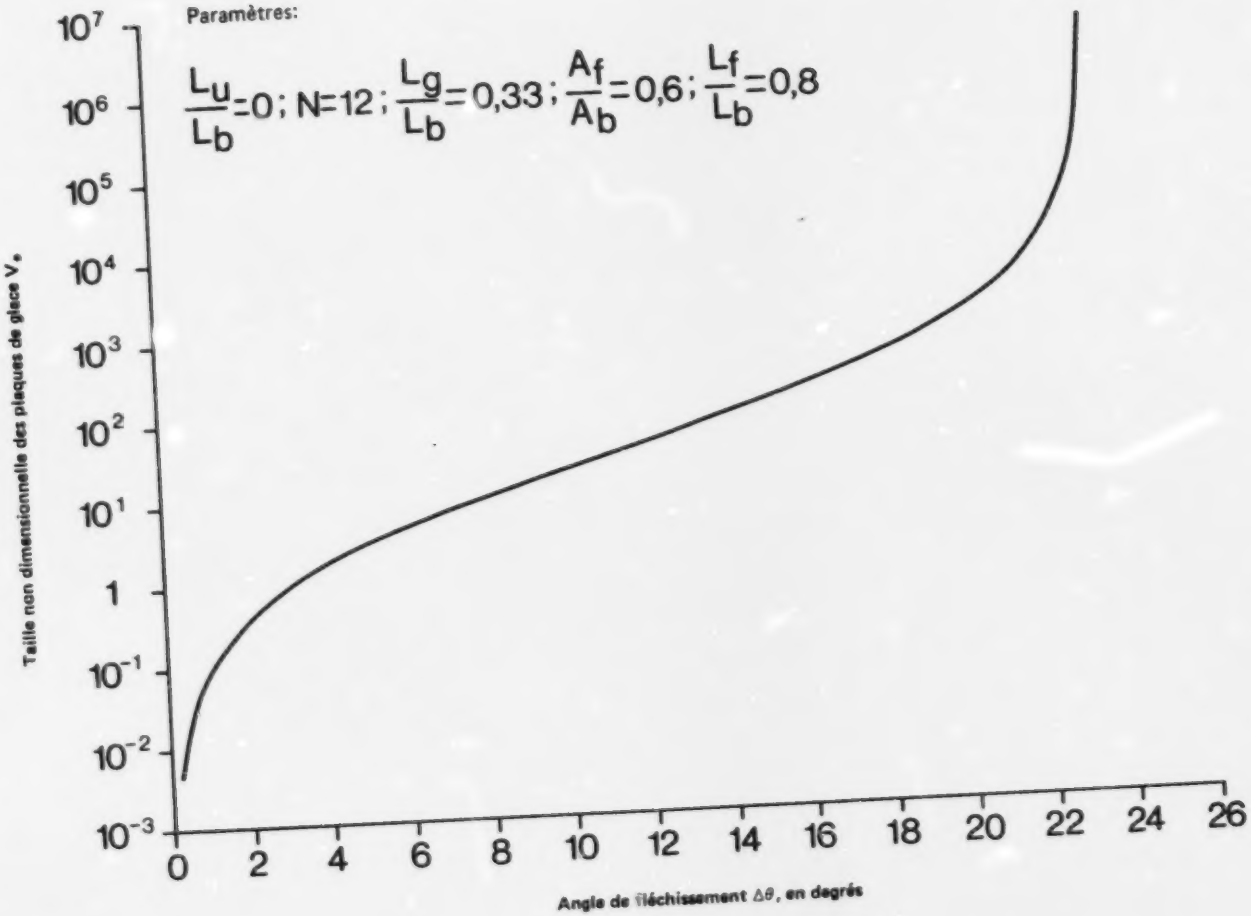


FIGURE 30 Relation théorique entre la taille de la plaque de glace déviée et l'angle de fléchissement du prototype

était environ 9,5°. On présume que cet angle maximal a été atteint lorsque l'estacade a été frappée par la plaque de glace de 20 m x 20 m x 0,2 m.

La relation théorique qui existe entre l'angle de fléchissement et la taille de la plaque de glace pour le prototype a été calculée et transcrite sous forme graphique dans la figure 30. L'examen de la figure 29 montre que pour un angle de fléchissement de 9,5°, la taille sans dimension de la plaque de glace qu'il est possible de faire dévier de sa trajectoire est $V_{i_*} = 17$.

Connaissant la valeur de V_{i_*}, il est possible de calculer la taille de la plaque de glace à partir de la définition de V_{i_*} (voir l'équation 28):

$$V_{i_*} = \frac{1}{K} \frac{A_i t_i}{L_b^2 H_b} \tag{36}$$

Dans l'équation ci-dessus, K est défini par la formule suivante:

$$K = \frac{\rho C_D}{\rho_i \eta} \tag{37}$$

Comme les valeurs exactes du coefficient de traction C_D et du coefficient de masse virtuelle η ne pourront être évaluées qu'à l'aide d'expériences qu'on prévoit mener sous peu, nous leur donnons provisoirement une valeur approximative de 2, ce qui nous permet d'évaluer à environ 1 la valeur de K. En utilisant $K = 1$, $t_i = 20$ cm, $H_b = 23$ cm et $L_b = 3{,}05$ m, valeurs calculées lors de l'expérience sur le terrain, on obtient une taille de 13,5 m x 13,5 m x 0,2 m, ce qui est comparable à la plus grosse plaque de glace qu'il nous a été donné d'observer (20 m x 20 m x 0,2).

Le tensiomètre relié à l'estacade pour mesurer la force de traînée n'a malheureusement pas fonctionné. Toutefois, on a pu se rendre compte que trois hommes suffisaient pour tirer l'estacade et que deux hommes pouvaient ajuster l'orientation des safrans.

Un déflecteur permettant de récupérer des hydrocarbures déversés accidentellement dans un cours d'eau qui charrie des glaces a fait l'objet d'une étude théorique détaillée, suivie d'expériences préliminaires en laboratoire qui ont elles-mêmes abouti à la construction d'un prototype et à des essais sur le terrain. L'étude a démontré qu'il est possible de construire et d'installer ce type de déflecteur dans un cours d'eau qui charrie des plaques de glace et qu'il est efficace pour récupérer les hydrocarbures s'y étant déversés.

D'autres travaux sont en cours en laboratoire et sur le terrain pour obtenir les paramètres nécessaires de conception, améliorer cette dernière, la méthode d'installation et la tenue du déflecteur et comparer avec plus de détails l'expérience et la théorie.

BIBLIOGRAPHIE

1. Brodsky, L., M.E. Charles, G.D. Greene et D. Mackay, 1977. "The Use of Deflectors for the Deployment of Oil Booms at an Angle to River Currents". Petroleum Association for Conservation of the Canadian Environment, rapport PACE n° 77-3.

2. Eryuzlu, N.E. et R. Hausser, 1977. "Use of Floating Deflector for Oil Spill Control in Fast Flowing Waters". Actes de la 1977 Oil Spill Conference, New Orleans, p. 335-340.

3. Foley, J.P. et S.J. Tressidder, 1977. "The St.Lawrence River Oil Spill of June 23, 1976 – Are You Ever Truly Ready". Actes de la 1977 Oil Spill Conference, New Orleans, p. 81-86.

4. Koroleff, A., 1932. "Glance Booms". Association Canadienne des producteurs de pâtes et papiers, Division des bois et forêts. Index n° 261 (B-9-e).

5. Lamb, H., 1932. "Hydrodynamics", 6e édition, Cambridge University Press, p. 76-77.

6. Lazier, S.S., 1964. "Water Transportation of Pulp Wood". Association Canadienne des producteurs de pâtes et papiers, Division des bois et forêts. Index n° 2297 (B-9-a).

7. Tsang, G., 1975. "Ice Conditions and the Proposed Containment and Removal of Spilled Oil on the St. Clair and Detroit Rivers". Série scientifique n° 56, Direction des eaux intérieures, Environnement Canada.

8. Vanderkooy, N., A. Robertson et C.J. Beckett, 1976. "Evaluation of Oil Spill Barriers and Deployment Techniques for the St. Clair–Detroit River System". Développement des techniques, rapport EPS-4-EC-76-4, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada.